Health Canada Santé Canada

Guidelines for the Safe Use of Ultrasound: Part II – Industrial and Commercial Applications

Safety Code 24

Canada

Guidelines for the Safe Use of Ultrasound: Part II – Industrial and Commercial Applications

Safety Code 24

Environmental Health Directorate
Health Protection Branch

Published by authority of the Minister of
National Health and Welfare

Également disponible en français sous le titre :
Code de sécurité 24. Principes d'utilisation des ultrasons – Partie II : applications industrielles et commerciales

EHD-TR-158

© Minister of Supply and Services Canada 1991

Available in Canada through

Associated Bookstores
and other booksellers

or by mail from

Canadian Communication Group – Publishing
Ottawa, Canada K1A 0S9

Catalogue No. H46-2/90-158E
ISBN 0-660-13741-0

101-04462/

Foreword

Ultrasound is applied extensively in industry, commerce, the military and the home. Evidence on the harmful health effects of exposure to ultrasound suggests that a cautious approach should be taken in its use. The purpose of this document is to provide guidance on the safe use of ultrasound in commercial and industrial applications. The recommended safety procedures and protective measures are based upon information provided here on the health effects of both contact and airborne ultrasound exposure. Exposure criteria are given in Table 5 in Section 4.2.1. In addition, some guidance is provided for the measurement of airborne ultrasound in Appendix 1.

A document such as this cannot cover all possible applications or exposure situations. Nor can it substitute for the exercise of sound judgment in unusual circumstances for which the recommendations may need to be modified.

This document was prepared by Stephen Bly and Deirdre Morison, Bureau of Radiation and Medical Devices. Technical assistance was provided by Robert Hussey and Judy Zohr.

Helpful reviews and comments, provided on request by the following people, were given careful consideration during the preparation of this document. Their contribution is gratefully acknowledged: E. Callary, D. Johnson and E.G. Létourneau, Bureau of Radiation and Medical Devices; H.K. Lee, Occupational Health Unit, Medical Services Branch, Health and Welfare Canada; G.S.K. Wong, Acoustics and Mechanical Standards Section, National Research Council of Canada; D. Novitsky, Occupational Health Branch, Alberta; T.E. Dalgliesh, Department of Health and Fitness, Nova Scotia; K.L. Davies, Department of Health and Community Services, New Brunswick; R.N. Ross, Ministry of Health, British Columbia; M.E. Bitran, Ministry of Labour, Ontario; J. Herbertz, University of Duisburg (W. Germany); F. Dunn, University of Illinois at Urbana-Champaign; B.V. Seshagiri, Occupational Safety and Health Branch, Labour Canada; B. Pathak, Physical Hazards Group, Canadian Centre for Occupational Health and Safety.

The information in this document is provided for guidance only. Should any problems arise on the interpretations of the text, contact:

Non-Ionizing Radiation Section
Bureau of Radiation and Medical Devices
Department of National Health and Welfare
Ottawa, Ontario, Canada K1A 0L2

p ;;;

PageList of ables

Table 1	Industrial Applications of High Power Ultrasound	8
Table 2	Selected SPLs in dB at the Operator's Position in 1/3 Octave Bands from Industrial Ultrasonic Sources	20
Table 3	Exposure SPLs in dB for Various Commercial Devices	20
Table 4	Examples of Occupational Exposure SPL Limits (in dB)	25
Table 5	Canadian Exposure Guidelines for Airborne Ultrasound	25

1. Introduction

These guidelines, including exposure limit criteria, aim to assure the safe use of industrial and commercial ultrasound. They cover a large number of varied applications of ultrasound, which use quite different mechanisms to produce their desired effects. Table 1, from Shoh (Sh 75) and Michael (Mi 74), lists the major applications of high-power ultrasound together with the ultrasound frequency, power range and a brief description of the process involved in the application.

The physical and biophysical effects of high-power ultrasound generally depend on the following complex, vibration-induced phenomena in matter:

1. cavitation and microstreaming in liquids;

2. surface instability occurring at liquid-liquid and liquid-gas interfaces;

3. heating and induction of fatigue in solids;

4. heating in liquid and liquid-like media.

In high-power industrial ultrasound the objective is to expose the workpiece to vibratory energy of sufficient intensity to bring about a permanent physical change. The main hazard to the user is from accidental contact exposure to the ultrasonic wave. However, many industrial and commercial uses of ultrasound also incidentally generate and propagate high sound-pressure levels in the air in the sonic and ultrasonic range. When this happens, a hazard may also arise from the ear's reception of the airborne ultrasound.

able I.
Industrial Applications of HiTh Power Ultrasound [From Shoh (Sh 75) and Michael (Mi 74)].

Application	Description of Process	Frequency (kHz)	Intensity Range (W/cm^2)
Cleaning and degreasing	Cavitated cleaning solution scrubs parts immersed in solution	20 - 50	Approximately 1 - 6 W/cm^2 of driving area
Soldering and braising	Displacement of oxide film to accomplish bonding without flux	-	1 - 50 W/cm^2
Plastic welding	Welding soft and rigid plastic	About 20	Approximately 100 W/cm^2 at the weld (700 W)
Metal welding	Welding similar and dissimilar metals	10 - 60	Approximately 2000 W/cm^2 at the welding tip
Machining	Rotary machining, impact grinding using abrasive slurry, vibration assisted drilling	Usually 20	
Extraction	Extracting perfume, juices, chemicals from flowers, fruits, plants	About 20	About 500 W/cm^2 (100 - 500 watts)
Atomization	Fuel atomization to improve combustion efficiency and reduce pollution and dispersion of molten metals	Between 20 and 300	
Emulsification, dispersion, and homogenization	Mixing and homogenizing of liquids, slurries, creams	-	-
Defoaming and degassing	Separation of foam and gas from liquid, reducing gas and foam content	-	-
Foaming of beverages	Displacing air by foam in bottles or container prior to capping	-	-
Electroplating	Increases plating rates and produces denser, more uniform deposit	-	-
Erosion	Cavitation erosion testing, deburring, stripping	-	-
Drying	Drying heat sensitive powders, foodstuff, pharmaceuticals	-	-

A number of direct commercial applications of airborne ultrasound, including burglar alarms, automatic door-openers, TV converters and automatic camera-focusing devices, can also, in some cases, yield relatively high sound-pressure levels at ultrasonic frequencies. Again, the hazard from the airborne ultrasound may arise from reception by the ear.

To make allowances for differences between these two types of hazards, separate guidelines and rationales are given for contact and for airborne ultrasound exposures.

Commercial Ultrasound

.1 Contact E osures

Contact exposure is exposure for which there is no intervening air gap between the transducer and the tissue. This may be via direct and intimate contact between the transducer and the tissue or it may be mediated by a solid or liquid. Contact exposure can in some cases provide nearly 100% energy transfer to tissue. However, an air gap can diminish the ultrasonic energy transferred by orders of magnitude. For example, if a person's finger is directly irradiated in the water bath of an ultrasonic humidifier, the energy transferred to the bone is approximately 65% of that which is radiated; but if the finger is just outside the water, one million times less ultrasonic energy is transferred to the finger.

The in vivo mammalian biological effects data for ultrasound contact exposure in the low MHz frequency range are summarized by the graph shown in Figure 1 (NCRP 83). The plots show the intensities below which no significant, independently confirmed biological effects have been observed.

Devices such as ultrasonic humidifiers operating in the low MHz frequency range can readily cause tissue injury *if and only if* there is a contact exposure. It is known from anecdotal reports that at full ultrasonic power, contact exposure of a finger to the ultrasonic beam from an ultrasonic humidifier will cause sharp pain within seconds, likely due to overheating of the bone.

There also exists the potential for hazardous effects below the MHz frequency range with high-power ultrasound. For example, high-power ultrasonic waves are used in ultrasonic cleaners and cell disintegrators because of their destructive and violent effects. It is certainly reasonable to assume that relatively intense cavitation activity occurs in the water (or solvent) baths of such devices (Ac 83; WHO 88). Nonetheless, documented cases of actual tissue damage are rare. In one documented study, exposure to ultrasound in ultrasonic cleaners operating at frequencies between 20 and 40 kHz

was reported to have caused pain in the hands of the volunteers. However, exposure to ultrasound in an 80 kHz cleaner led to no immediate observable effects (Fi 68).

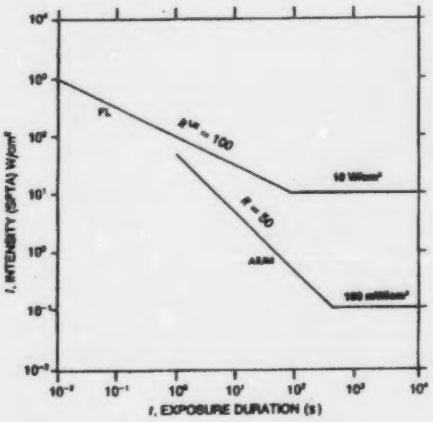


Figure 1.
Plots showing intensities below which no independently confirmed significant biological effects have been observed in mammalian tissues. The upper plot (FL) applies to focal lesions; the intensities are in situ values. The lower one (AIUM) is a graphical representation of the in vivo mammalian bioeffects statement of the Bioeffects Committee of the American Institute for Ultrasound in Medicine (AIUM). The ultrasonic frequencies are in the range of 1 to 10 MHz and the spatial peak time average intensities, I(SPTA), are measured in water (NCRP 83).

In two reviews of the hazards of industrial ultrasound (Ac 77, Ac 83), Acton was unable to substantiate reports of necrosis or bone degeneration due to persistent exposure to liquid coupled ultrasound. Furthermore, in a recent study by Carnes and Dunn (Ca 86), testicular damage was observed in only 4 of 150 mice exposed to ultrasound from a 25 kHz tissue homogenizer operating at an intensity of 15 W/cm^2.

The literature on devices such as ultrasonic cleaners and tissue homogenizers is confusing: these devices do not appear to be as hazardous as expected, given the effects they were designed to create. Nonetheless, although reports of biological effects are surprisingly rare, exposure to the liquid-borne ultrasound from these devices clearly can cause tissue injury, and protection measures are necessary.

The literature indicating the hazards of devices such as ultrasonic bonding machines is even more sparse. However, a recent report (Fe 84) described a thermal injury inflicted by a direct contact exposure with an ultrasonic bonding machine used in the bonding of plastics, operating at 20 kHz. An exposure of only a fraction of a second was enough to cause a serious localized burn on the operator's finger.

Although those who work with an industrial ultrasound device would not, through design of the device, experience direct solid or liquid contact with transducers emitting high power (or high intensity) ultrasound, direct contact exposure can occur through accidents or carelessness. Therefore, appropriate precautions must be taken to avoid accidental exposure.

2.2 Airborne Ultrasound

Concern about the possible effects of exposure to airborne ultrasonic and upper sonic[1] radiation began in the late 1940s with reports of "ultrasonic sickness" in personnel working around jet aircraft (Da 48). These concerns led to research into the auditory and non-auditory biological effects of airborne ultrasound.

1. See the Glossary (Appendix 2) for the meaning of this and other terminology used in this document.

2.2.1 Heating and Cavitation

The most plausible mechanisms for non-auditory effects of airborne ultrasound on a human are heating and cavitation. The examples of cavitation thresholds given by Neppiras (Ne 80) suggest that airborne ultrasound would not give rise to cavitation except at a sound pressure level (SPL) above approximately 190 dB. This is well above the levels for which heating effects would occur.

A number of studies of effects of airborne ultrasound have been undertaken on mammals and insects; the observed effects were interpreted as being due to heating. At 160 dB[2] at 20 kHz, Allen et al. (Al 48) reported the death of insects and mice as a result of exposures ranging from 10 seconds to 3 minutes. In these experiments it was established that the heating produced by sound absorption was sufficient to cause death. Work by Parrack and co-workers indicated that, at ultrasonic frequencies, most of the absorption found in rat studies was due to the fur on the rat (Gi 49, Gi 52, Pa 66). The ratio of the absorbed to incident intensity for the human body surface appeared to be about an order of magnitude smaller than that for a shaved rat. Danner et al. (Da 54) found that the heating threshold for mice occurred at an SPL of 144 dB for furred mice and 155 dB for shaved mice at frequencies of 18 - 20 kHz. These results suggest that an SPL of at least 155 dB would be necessary to produce a rapid damaging temperature elevation in humans, and Parrack's calculations (Pa 66) suggest that 180 dB would be required to be lethal to a human.

Further information on the ultrasonic heating of humans is found in the incidental human exposures reported in the work of Allen et al., in which an SPL of 165 dB was used (Al 48). Local heating in the crevices between fingers caused burns almost instantly at these levels. Painful heating occurred after several seconds of exposure of broader surfaces such as the palm of the hand. In addition, Acton (Ac 74) has reported on unpublished work by Parrack indicating that mild heating in skin clefts has been observed in the SPL range of 140-150 dB. Other non-auditory effects at these high levels included extremely disagreeable sensations in the nasal passages.

2. In air, the conversion from SPL in dB to intensity, I, in W/cm^2 is given by $I = 10^{((SPL-160)/10)}$. Thus, a SPL of 160 dB has an intensity of 1 W/cm^2.

It can be concluded that, at SPLs greater than approximately 155 dB, acute harmful effects will occur in humans exposed to airborne ultrasound, primarily as a result of sound absorption and subsequent heating. It is plausible that chronic lengthy exposures to levels between 145 and 155 dB might also be harmful, as they could raise body temperatures to mild fever levels during the exposure periods. However, as indicated in Section 3 of this guideline, such high sound-pressure levels have never been encountered in either commercial or industrial applications.

2.2.2 Auditory Effects – Hearing and Physiological

The major effects of airborne ultrasound of concern in practice are the result of reception by the ear. The effects fall primarily into two categories: the so-called "subjective" effects on the central nervous system and damage to the ear. These effects form the basis for exposure guidelines as they occur at lower sound pressure levels than those which give rise to heating.

Two reports have indicated temporary hearing loss at frequencies below 8 kHz due to a high SPL of airborne ultrasound. Parrack (Pa 66) reported that for five-minute exposures at selected frequencies in the range from 17 to 37 kHz at SPLs between 148 and 154 dB, hearing sensitivity was reduced at the subharmonic frequencies. Slight losses also occurred occasionally at the third subharmonic. Recovery from the losses was rapid and complete. Dobroserdov (Do 67) measured reductions in auditory sensitivity at 4, 10, 14 and 15 kHz after one hour's exposure to 20.6 kHz ultrasound at an SPL of 120 dB. No significant effects were observed at SPL exposures of 100 dB by Dobroserdov.

Sound pressure levels lower than 120 dB at ultrasonic frequencies have not been demonstrated to cause hearing losses. In a study of 18 men working with ultrasonic cleaners and other ultrasonic instruments, Knight (Kn 68) found no evidence of hearing loss attributable to ultrasonic exposure. Acton and Carson (Ac 67) found no temporary threshold shifts (TTS) in a study of 31 ears in 16 subjects exposed to SPLs of up to 110 dB in the 1/3-octave bands centred on 20 and 25 kHz. Grigor'eva (Gr 66) exposed five volunteers to 110 - 115 dB of a 20 kHz pure tone for one hour and found no change in auditory sensitivity (or pulse rate or skin temperature). However, a TTS appears to have been observed by Grigor'eva for exposure to pure tones at 16 kHz for SPLs greater than 90 dB.

Recently Grzesik and Pluta (Gr 83) studied the hearing of 55 ultrasonic cleaner and welder operators. No significant differences in thresholds of hearing between exposed and controls were observed at frequencies between 0.5 and 8 kHz. However, the authors claimed significant differences in hearing between exposed and control subjects in the 10 - 20 kHz range. They claimed threshold elevations and a decreasing number of subjects responding to stimuli at the highest audible frequencies. In a follow up of 26 of these workers, Grzesik and Pluta (Gr 86) suggested that a hearing loss of approximately 1 dB/year occurs in the frequency range of 13 - 17 kHz due to the occupational exposure of these workers to the acoustic fields created by the ultrasonic cleaners and welders. The acoustic spectra of these devices (Gr 80, Gr 83) indicated that the SPLs were in the range of 80 to 102 dB at frequencies between 10 and 18 kHz, the upper sonic frequencies, whereas the SPLs were in the range of 100 to 116 dB at frequencies greater than 20 kHz. In the absence of a detailed correlation between the acoustic spectra and the measured effects on hearing, it is impossible to say with certainty which frequencies were responsible for the high-frequency hearing losses. However, it is more likely that the upper sonic rather than the ultrasonic radiation led to the measured hearing losses in these studies since high SPLs at upper sonic frequencies were found more frequently than at ultrasonic frequencies (Gr 80, Gr 83). Also, as noted above, TTSs have apparently been observed for subjects exposed to pure tones at upper sonic frequencies between 10 and 16 kHz, with SPLs greater than 90 dB. Furthermore, there is no other substantiated evidence for effects on hearing below ultrasonic SPLs of 120 dB.

Other physiological effects of airborne ultrasound are likely to occur only at SPLs greater than or equal to those which would lead to TTS. Knight (Kn 68) and Grigor'eva (Gr 66) found no evidence for any physiological effects at ultrasonic frequencies. Dobroserdov (Do 67) found significant loss of balance stability and reduced motor response time for exposures to 120 dB at 20 kHz, but the effects were insignificant at 100 dB at the same frequency.

2.2.3 "Subjective" Effects

A number of "subjective" effects have been reportedly caused by airborne ultrasound, including fatigue, headache, nausea, tinnitus and disturbance of neuromuscular coordination (Sk 65, Ac 67, Ac 68, Cr 77, FDA 81(b)). Skillern (Sk 65) measured the 1/3-octave band spectra from 10 to 31.5 kHz from a number of ultrasonic devices and found that subjective effects were associated with devices which produced SPLs greater than 80 dB in this frequency range.

Acton and Carson (Ac 67), investigated effects of exposure to ultrasound on 18 young females working near a bank of "ultrasonic" cleaners. They were exposed to both ultrasound and audible acoustic energy and complained of fatigue, headache, nausea and tinnitus. The same symptoms were found in subsequent laboratory experiments in which human subjects were exposed to high-frequency acoustic radiation with audible components. When these same subjects were exposed to similar high-frequency energies, but without audible components, no complaints occurred, leading Acton and Carson to conclude that audible components had to be present for a subjective effect to be observed. They supported this finding by noting that women complained about these effects more than men. Since the exposed males were older and all had history of noise exposure as well as high frequency hearing losses, they assumed that the exposure radiations were largely inaudible to many of the men.

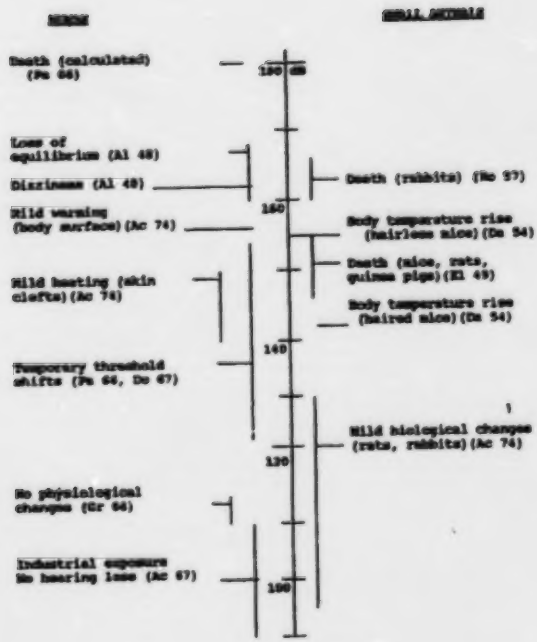
A detailed analysis of Acton and Carson's data indicated that subjective effects were not found if the 1/3-octave band SPLs were less than 75 dB for centre frequencies up to and including 16 kHz and less than 110 dB for centre frequencies greater than or equal to 20 kHz (Ac 68). Acton indicated that this criterion for the occurrence of subjective effects was also consistent with Skillern's data (Sk 65) and suggested it as an exposure criterion. Acton modified the criterion in 1975 (Ac 75). In the revised criterion, the 75 dB limit was extended to include the 1/3-octave band centred on 20 kHz. This was done when more reports of subjective effects were documented by Acton. He found that subjective effects could still occur below 110 dB in the 20 kHz, 1/3-octave band (Ac 75). This was interpreted as being because the nominal frequency limits of the 1/3-octave band centred on 20 kHz are 17.6 kHz and 22.5 kHz. The lower end of this frequency band was within the upper end of the audible frequency range of a significant proportion of the population and therefore subjective effects could occur at relatively low levels.

Taken together, the results on subjective effects indicate that they are a reaction of the central nervous system to the upper sonic frequencies or ultrasound as they become audible. The shape of Acton's empirically derived criterion suggests that ultrasound could be made audible if the sound pressure levels were high enough and that the threshold of hearing should rise rapidly in the transition from upper sonic to ultrasonic frequencies. This is qualitatively consistent with free-field SPLs for the average threshold of hearing measured by Herbertz and Grunter (He 81, He 84) for sonic and ultrasonic frequencies ranging from 10 to 31.5 kHz. Their values were averaged for two separate studies on a total of 30 subjects with normal hearing

who were between the ages of 20 and 41. The average threshold of hearing increased rapidly and monotonically with frequency at a rate of approximately 12 dB per kHz between 14 and 20 kHz leading to an average threshold of hearing of approximately 100 dB at 20 kHz (He 84) and approximately 125 dB at 25 kHz. Above 20 kHz the ultrasound may appear audible because subharmonics are generated in the ear (Gi 50). Such a phenomenon has been observed at levels greater than 110 dB in the chinchilla and guinea pig (Da 66). The hypothesis that ultrasound appears audible due to generation of the subharmonics within the ear is also consistent with Parrack's study referred to above, involving short-term hearing loss at subharmonics of exposure frequencies after exposure to high SPLs of airborne ultrasound (Pa 66).

To summarize, exposure to ultrasonic radiation, when sufficiently intense, appears to result in a syndrome involving manifestations of nausea, headache, tinnitus, pain, dizziness, and fatigue. The type of symptom and the degree of severity appear to vary depending upon the actual spectrum of the ultrasonic radiation and the individual susceptibility of the exposed persons, particularly their hearing acuity at high frequencies.

A concise summary of the physiological effects of ultrasound with specific stated exposure conditions has been given by Acton. It is shown in a modified form in Figure 2 (Ac 74).


Death (calculated) (Fe 66)
Loss of equilibrium (Al 48)
Dizziness (Al 48)
Mild warming (body surface) (Ac 74)
Mild heating (skin clefts) (Ac 74)
Temporary threshold shifts (Fe 66, Do 67)
No physiological changes (Gr 66)
Industrial exposure No hearing loss (Ac 67)
Death (rabbits) (Ro 57)
Body temperature rise (hairless mice) (Da 54)
Death (mice, rats, guinea pigs) (El 49)
Body temperature rise (haired mice) (Da 54)
Mild biological changes (rats, rabbits) (Ac 74)
160
140
120
100

FITure 2.
Physiological Effects of Airborne Ultrasound (Figure adapted from one by Acton (Ac 74)).

3. Human Exposure to Airborne Ultrasound

There have been a number of reports and investigations into the exposure of workers to airborne ultrasound (Sk 65, Pa 66, Mi 74, Ac 67, Do 67, Gr 80, Sw 82, An 86). A wide variety of SPL values were obtained depending on the device, the location of measurement relative to the device, and whether the device is enclosed. Selected examples of SPLs, as measured at the operator's position, are given in Table 2.

Grzesik and Pluta (Gr 80, Gr 83) measured 1/3-octave band SPLs at the operator's position from ultrasonic cleaners at 25 and 28 kHz and at the subharmonic frequencies of 12.5 and 14 kHz. The SPLs at the fundamental frequencies were between 100 and 116 dB and the subharmonics had SPLs of 80 -102 dB. For ultrasonic welders, the average frequency was 21 kHz and the highest SPL was 106 dB in the 20 kHz 1/3-octave band. The results obtained over the past 25 years have for the vast majority of cases remained in agreement with Grigor'eva's statement that sound pressure levels from ultrasonic machinery in the ultrasonic frequency range rarely exceed 120 dB (Gr 66).

Since 1976, a number of measurements of airborne ultrasound SPLs from commercial devices have also been made by the Bureau of Radiation and Medical Devices (BRMD) in Canada and by the Center for Devices and Radiological Health (CDRH) of the Food and Drug Administration (FDA) in the U.S.A. Table 3 contains several examples of the largest SPLs found for typical exposure positions. Since these devices emit pure tones, the side band values are not given. Exposures from commercial devices are usually from single pure tones (although sometimes frequency sweeps are also used) and tend to be at lower SPLs than exposures from industrial devices.

able 2.
Selected SPLs in dB at the Operator's Position in 1/3-Octave Bands from Industrial Ultrasonic Sources

Reference	Ultrasonic Device	1/3 Octave Band Center Frequency (kHz)					
		10	12.5	16	20	25	31.5
(Sk 65)	Drill (no enclosure)	91	85	90	81	108	84
(Sk 65)	Welder	76	95	115	93	73	69
(Sk 65)	Cleaner	<61	<61	<61	83	67	<61
(Sk 65)	Cleaner	77	78	79	96	77	77
(Pa 66)	Jet engine (after-burner) power	114	113	11	108	106	103
(Cr 77)	Cleaner	86	77	86	105	97	80
(Ac 67)	Drill	75	67	75	97	75	78
(Ac 67)	Cleaner (small)	53	61	91	83	75	102
(Ac 67)	Cleaner (large)	83	86	91	96	91	102
(An 86)	Welder	NA	NA	NA	127	NA	NA
(An 86)	Welder	NA	NA	NA	106	NA	NA
(Sw 82)	Cleaner	78	66	76	97	74	70
(Sw 82)	Welder (no enclosure)	106	114	119	96	80	56

able 3.
Exposure SPLs in dB for Various Commercial Devices.

Reference	Ultrasonic Device	1/3-Octave Band Center Frequency (kHz)						
		10	12.5	16	20	25	31.5	40
BRMD	Video display terminal (VDT)	-	-	66	-	-	-	-
CDRH(a)	VDT	-	-	61	-	-	-	68
BRMD	Ultrasonic person sensor	-	-	-	-	94	-	-
CDRH(b)	Ultrasonic intrusion alarm	-	-	-	93	-	-	-
CDRH(b)	Ultrasonic dog repeller	-	-	108	-	-	-	-

(a) From (FDA 81(a)). Results for two separate VDTs at widely separated frequencies are shown here.

(b) From (FDA 81(b)). The exposure site for the ultrasonic dog repeller is atypical, in this case, being five feet in front of the repeller. In most cases, the dog, rather than a human, would be at this position.

In summary, exposure to industrial ultrasonic devices rarely exceeds 120 dB. Exposure to commercial devices designed to emit ultrasound rarely exceeds 110 dB. Commercial devices which incidentally emit ultrasound, such as VDTs, yield SPLs at the operator's ear of less than 70 dB and only rarely exceed 65 dB.

Industrial ultrasonic devices also produce audible noise. These sonic exposures must not be ignored in considering the hazards of industrial ultrasonic equipment. There is ample evidence in the studies noted in Section 2 that the upper sonic and sonic emissions from ultrasonic devices are considerably more hazardous than ultrasonic emissions for equivalent SPLs.

4. Guidelines for Safe Use

4.1 Contact Ultrasound

Contact exposure to high-power ultrasound must be avoided at all times.

The following steps are recommended to ensure the safe use of high-power ultrasound, which is generally employed in order to bring about a permanent physical change in a system:

1. Limited occupancy –
   Only operators qualified to use high-power ultrasound equipment or persons under strict supervision should be allowed within the boundaries of the controlled area while the equipment is operating.
2. Responsibility of personnel –
   Personnel using high-power ultrasound, and safety inspectors in industry, should be knowledgeable about the possible harmful effects of ultrasound and necessary protective measures.
3. Warning signs –
   The warning sign for ultrasound radiation recommended for use is shown in Figure 3. Warning signs should be placed at the entrance to any area which contains high power ultrasound equipment or applied to each high power ultrasound device. Accompanying each warning sign there should also be a statement indicating the precautionary measures to be taken while the ultrasound power is on.
4. Ultrasonic cleaning tanks –
   Labels should be placed on all ultrasonic cleaning tanks cautioning nearby personnel not to immerse hands or other parts of the body in the tank while it is operating.

ULTR

DANGER

FITure 3.
Ultrasound Radiation WarnInT SiTn.

For large cleaning baths, which cannot be easily turned off when objects are removed or introduced, objects can be suspended from hooks or in baskets. If these protective measures cannot be incorporated and immersion of hands and arms is required, then, as a last resort, gloves lined with flock or fur should be used. They can provide adequate protection since the trapped air layer provides a sufficient acoustic impedance mismatch to reduce the ultrasonic energy transmitted to the body. However, the gloves must be long enough and in good condition (Ac 77), as loss of this air layer would destroy the protection.

5. Other high-power ultrasound devices –
   Any high-power ultrasound device which might cause a person to receive contact exposure to the ultrasound should carry a label specifying that the device, or a certain part of it, should not be touched while it is operating. Where required, solid sources of ultrasound can be manipulated with suitable tools.
   The levels of low-power ultrasound as used in non-destructive testing are such that, in general, there is little chance of harm occurring from brief accidental contact exposure. However, since biological effects data are still inconclusive, unnecessary contact exposure should be avoided.

4.2.1 Human Exposure Limits

Based on slightly differing interpretations and analyses of the biological effects studies described in Section 2, a number of similar human exposure limits have been recommended in several different countries for upper sonic and ultrasonic radiation. These are summarized in Table 4 (Ma 85).

Two other, quite different criteria have also appeared. The U.S. Air Force (USAF 76) retains an 85 dB limit for each 1/3-octave band from 12.5 to 40 kHz. Based on comparisons to some of Skillern's and Acton's spectra giving rise to subjective effects, these limits may be too high in the 16 and 20 kHz bands to adequately protect against subjective effects and unnecessarily restrictive in the 25 to 40 kHz bands. The other guideline has been presented by auf der Maur in his review article (Ma 85). This proposal, which is based on the AU weighted filter suggested by Herbertz (He 84), has apparently been under consideration by several organizations. However, the high levels it allows, such as 105 dB in the 16 kHz band, 120 dB in the 20 kHz band and 140 dB for the 31.5 kHz band, appear to be excessively high when seen in relation to the data on subjective effects. In addition, the levels permitted in the 16 and 20 kHz bands by this guideline are greater than or equal to those for which Grigor'eva and Dobroserdov appear to have observed TTS in their exposed subjects (Gr 66, Do 67). The value of 140 dB is at the lower limit of the range in which observations of mild heating of skin clefts have been reported (Ac 74).

At present, Acton's modified 1/3-octave criterion appears to be the most suitable as a basis for exposure limits. It is based on the most detailed published comparison available of 1/3-octave band spectra and the presence of subjective effects.

The Canadian recommended exposure limits are given in Table 5. These are given in 1/3-octave bands from 16 kHz to 50 kHz. The exposure limits are independent of time as subjective effects can occur almost immediately (IRPA 84). Below the 16 kHz 1/3-octave band, the sound must clearly be classified as audible and should be assessed through criteria given in the appropriate existing federal, provincial or municipal noise legislation. The large step between the 1/3-octave 20 kHz band and the 1/3-octave 25 kHz band is based on the empirical analysis of industrial exposure by Acton. It is qualitatively consistent with the steep rise in the average threshold of hearing measured by Herbertz and Gruntер (He 81, He 84), from approximately 75 dB at 17.5 kHz to 115 dB at 22.5 kHz.

able 4.
Examples of Occupational Exposure SPL Limits (in dB).
he SPLs are for 1/3-octave bands.

					Proposed By*	
Frequency kHz	1	2	3	4	5	6
8	90	75	-	-	-	-
10	90	75	-	-	80	-
12.5	90	75	75	-	80	-
16	90	75	85	-	80	-
20	110	75	110	105	105	75
25	110	110	110	110	110	110
31.5	110	110	110	115	115	110
40	110	110	110	115	115	110
50	110	-	110	115	115	110

*Legend:
1. Japan (1971)
2. Acton (1975)
3. USSR (1975)
4. Sweden (1978)
5. American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH 89)
6. International Radiation Protection Agency (IRPA 84)

Adapted from (Ma 85)

able 5.
Canadian Exposure Guidelines for Airborne Ultrasound.
he SPLs, for 1/3-octave bands, are independent of time of exposure as subjective effects can occur immediately

Frequency (kHz)	SPL (dB)
16	75
20	75
25	110
31.5	110
40	110
50	110

The lnded in this guideline may be exceeded for occupational exposure, if reduction of the SPL via engineering controls is not possible (see 4.2.2. below) and workers are provided with ear protectors that reduce ultrasound levels at their ears to the sound pressure levels given in Table 5. However, in the ultrasonic frequency range, if potential problems due to heating are to be avoided, total linear measured SPL exposure to other parts of the body must never exceed 137 dB. This value is based on the lowest value (140 dB) (see Figure 2) which allegedly has led to mild heating of skin clefts. A safety factor of 3 dB (a factor of 2 in energy) should ensure that no significant heating of a human could occur.

4.2.2. Protective Measures for Airborne Ultrasound Exposure

Safety procedures for the protection of personnel are similar to those used for audible noise. The objective is to ensure that ambient sound pressure levels do not exceed the recommended maximum permissible exposure level. This is achieved first by measuring the SPL (see Appendix 1 for measurement techniques), and reducing exposure levels where required, preferably with engineering controls, reducing sound at its source or in its path by installing sound-absorbing material and containment baffles. If engineering controls are not possible, then ear protection should be used.

Protective measures are considerably simpler and more economical in the ultrasonic range than in the audible range since the higher ultrasonic frequencies tend to be much more readily absorbed and reflected inward by enclosures. In addition, they are less liable to diffraction through orifices. Gold et al. (Go 84) reported that cardboard 3 mm thick was adequate to reduce SPLs by 70 dB between 20 and 50 kHz. Crabtree and Forshaw (Cr 77) constructed relatively simple enclosures for several ultrasonic cleaners which had yielded airborne ultrasound SPLs greater than Acton's criterion. One enclosure, made of 3/4" plywood, lined with one-inch styrofoam and fitted with a top lid and front panel hinged with piano hinges, was effective in attenuating the SPL from 85 to 55 dB in the 16 kHz 1/3-octave band. Rooms constructed for large cleaners in a hangar were made with simple construction materials such as 1/2" gypsum board and 1/4" plywood. Sealing of the doors was entirely unnecessary and attenuation was at least 40 dB. Acton (Ac 67) described simple protective measures for a bank of ultrasonic cleaners. The enclosure was constructed from polyvinyl chloride and Perspex, with stainless steel runners on the outside of the enclosure for the doors. (These materials were used because they were resistant to the corrosive

fumes generated during the washing process.) Although the enclosure was far from perfectly sealed, Acton and Carson (Ac 67) were able to achieve attenuation of approximately 10 dB at 20 kHz and 15 dB at 40 kHz with this shielding, enough to eliminate the subjective effects.

In those cases where engineering controls are not feasible, reduction of sound at the receiver by ear protection for ultrasonic frequencies is simple and effective. The protection for ultrasonic frequencies is expected to be at least 14 dB for ear muffs and rubber ear plugs, and 24 dB for foam ear plugs (Ac 83).

Ap I 1
Airborne Ultrasound Measurement

Measurements should be made in the place (usually the workplace) where exposure of a person occurs. Preliminary field measurements should be made at a variety of positions. The final measurement of sound pressure level (SPL) should be at that position of the operator's ear which yields the largest SPL value. If there is another position at which other parts of the operator's body may be subjected to SPL measurement of 137 dB or more, then the SPL at that position should be used for comparison to exposure criteria.

The angle of incidence should be estimated for a directional signal unless the ultrasonic field is determined to be better approximated as a random incidence (diffuse) field. This can be done by observing changes in the sound level meter reading as a function of orientation of the microphone. For a directional signal, at frequencies for which angular orientation is significant, there will be a diminution of up to 10 dB in the meter reading as the angle of incidence changes from 0° (normal incidence) to 90° (grazing incidence). Finally, the measured spatial maximum SPL value, corrected for possible systematic errors, plus the absolute value of the estimated measurement uncertainty, is the quantity to be compared to the recommended permissible exposure limits of Table 5 in Section 4.2.1. The uncertainty should be obtained byadding the estimated contributions to the uncertainty from the various sources of error in the measurement.

In summary, in order to make a reasonable judgment of whether the guidelines have been exceeded it is important to find the position for the microphone which gives the largest sound pressure level after

correction for possible systematic errors. In addition, it is essential to make reasonable estimates of the measurement uncertainty. These procedures are discussed in more detail below.

The absolute calibration of a sound level meter at the measurement site is usually performed at a single frequency, often at or below 1 kHz. Therefore, for reliable measurements, a systematic correction should be made for the relative frequency response of the equipment used in the measurement of airborne ultrasound. The correction can be obtained from manufacturer's specifications, and the uncertainty in this correction should be used in the final uncertainty estimate. This cannot be determined solely from the sound level meter's standardized type because the tolerances permitted at high frequencies are extremely wide. For example, for a Type 1 precision sound level meter as defined in either Publication 651 of the International Electrotechnical Commission (IEC 1979) or ANSI S1.4-1983, a standard of the American National Standards Institute (ANSI 1983), the tolerances of the response at 16 kHz and up to 20 kHz are plus 3 dB and minus infinity. Above 20 kHz no tolerances are specified. Of course, suitable Type 1 sound level meters are available for the measurement of airborne ultrasound, but the meter reading will depend on the frequency response of the microphone and amplifiers of the sound level meter.

The frequency response of the sound level meter can be broken down into two components: the electrical frequency response of the sound level meter (which has standardized tolerances up to 100 kHz specified in ANSI S1.4-1985 (ANSI 1985)) and the frequency response of the microphone due to diffraction effects. At frequencies for which the microphone no longer appears to have negligible size, the frequency response also depends on the angle of incidence. Again, manufacturer's specifications should be used to make appropriate corrections for either the angular or random incidence response at the frequency of interest.

It may be possible to determine whether the ultrasonic field is well approximated as a free field or random incidence field by means of approximate field mapping and a knowledge of the approximate

angular dependence of the sound level meter reading, the size of the room, the material of the wall of the room or of obstructions in the room. If such a determination can be made, several different types of microphones could be suitable for measurement with relatively low uncertainty.[3]

If the conditions were always free field, then a 1/4-inch microphone designed for flat free field frequency response with protecting grid removed and operating at normal incidence would be suitable up to the 50 kHz 1/3-octave band. As long as corrections for the frequency response were made, a 1/4-inch microphone could also be used with the protecting grid in place. A 1/2-inch microphone designed for flat free field frequency response with protecting grid in place and operating at normal incidence would be suitable up to the 31.5 kHz 1/3-octave band or for narrow band signals up to 40 kHz. By using manufacturer's specifications for the relative frequency response, overall uncertainties in the sound level meter SPL reading can be kept to less than ±1.5 dB.

For random incidence fields, a 1/4-inch microphone designed for flat frequency response at random incidence with protection grid removed is most suitable. Again, the protection grid can be used as long as corrections are carefully applied. However, a 1/2-inch microphone is not suitable for random incidence fields at frequencies above 25 kHz due to the steep drop in the response.

The major difficulty with measurements of airborne ultrasound arises when the ultrasonic field is best described as a superposition of a random incidence and free field and it is not possible to determine the magnitude of each component. In this case, the best strategy for minimizing uncertainties is to use a 1/4-inch microphone with the protecting grid removed and operating at grazing incidence to the apparent directional component of the ultrasonic field. Under these

3. The following discussion on microphones provides an example of the planning required for airborne ultrasound measurements. It is based solely on microphone specifications of those used at BRMD. Other manufacturers' specifications may differ.

conditions, the difference between the response to the random incidence and free field components is less than 1 dB up to 30 kHz and less than 2 dB up to 40 kHz. Therefore, measurement uncertainties in the SPL reading can be kept to less than approximately ±2 dB. Unfortunately, routine use of the microphone without the protecting grid subjects it to a much greater risk of being irreparably damaged mechanically. Another strategy would be to use the 1/4-inch microphone with protecting grid near grazing incidence. Corrections could be made using a response midway between the random incidence response and the free field grazing incidence response. These differ by less than 4 dB up to 40 kHz. Using this approach, it should be possible to keep measurement uncertainties to less than ±3 dB. The steep drop in the grazing incidence free field response for a 1/2-inch microphone at about 20 kHz and the large differences between the normal incidence free field response and the random incidence response make a 1/2-inch microphone unsuitable for measurements in which a significant component of the ultrasonic field is at random incidence.

Dynamic range is also important in determining how measurements are to be made. The upper limit of SPL which can be reliably measured may be limited by the cable length because preamplifier output is limited by the capacitive loading of a long cable. In the range of 20 kHz to 50 kHz for the equipment in our laboratory, the SPL may be limited to less than 130 dB for cable lengths greater than 3 m long. The lower limit of reliably measurable SPL is limited by the size of the microphone. For example, 1/8-inch microphones cannot be used for the lower frequency ultrasonic measurements, even though the frequency response is very flat, because the low signal-to-noise ratio of such a small microphone limits the lowest reliably measurable SPL to approximately 76 dB, which is above the recommended exposure limits in the 16 and 20 kHz 1/3-octave bands.

Since the guidelines are given in terms of 1/3-octave band levels, 1/3-octave band filters (or a spectrum analyzer) must be used. The error in SPL associated with the frequency response of the filter and the SPL error associated with the analyzer's accuracy must be deter-

mined from manufacturer's specifications and included in the uncertainty estimate. In addition, because of the jump in permissible exposure from 75 to 110 dB when changing from the 20 to 25 kHz 1/3-octave band, care must be taken in measurement at 20 kHz. A device emitting only in the 25 kHz band could, depending on the "skirts" of a 20 kHz band filter, *appear* to be emitting a significant SPL in the 20 kHz band. In view of the relatively wide "skirt" tolerances specified in filter standards, such as CSA Z107.5-1975 (CSA 1975) or IEC 225 (IEC 1966, under revision), significantly different results may be obtained with various 1/3-octave band filters satisfying the specifications of the same standards. Therefore, the frequency response of the 1/3-octave band filter should be well known from manufacturer's specifications and taken into account in a measurement.

Ap I
Glossary

The purpose of this glossary is to explain terminology in the document which may be unfamiliar to some readers. The explanatory paragraphs are based on standard definitions given in the cited references. In some cases, definitions may have been shortened or paraphrased for explanatory purposes. The reader is referred to the cited standards for more rigorous definitions.

Cavitation – Broadly defined, any sonically generated activity of highly compressible bodies (bubbles) of gas and/or vapour in the propagation medium. An example of cavitation is the formation of bubbles in the liquid surrounding the active element of a cell disintegrator. For high-power ultrasound the bubble activity is usually unpredictable and violent (NCRP 83).

Free field – The propagation condition for the acoustic wave in a homogeneous, isotropic medium (such as air) where the boundaries of the medium (such as the walls of a room) exert a negligible effect on the acoustic wave (IEC 84).

Free field response – The response of a microphone to an incident acoustic wave which, with the microphone removed, would be propagating under free field conditions (IEC 84).

HiTh-power ultrasound – There is no standard definition for high-power ultrasound. For the purposes of this document, it is ultrasound of sufficient power or intensity to expose a workpiece to enough vibratory energy to bring about some permanent physical change (Sh 75).

MicrostreaminT – Circulatory fluid flow on the scale of micrometers. Often it occurs in the vicinity of vibrating bubbles which have been set into motion due to cavitation by high-power ultrasound (NCRP 83).

1/3-octave band – The interval between two frequencies whose ratio is $2^{1/3}$:1. These frequencies define the edges of the band. Normally, the band is referred to by its band centre frequency which is the geometric mean of the two edge frequencies. For upper sonic and ultrasonic frequencies the bands have been designated as the 10, 12.5, 16, 20, 25, 31.5, 40 and 50 kHz bands (CSA 75).

Random incidence – The propagation condition for acoustic waves that create an acoustic field that has statistically uniform energy density and for which the directions of propagation at any point are randomly distributed (IEC 84).

Random incidence response – The response of a microphone to an incident acoustic wave which, with the microphone removed, would be propagating at random incidence (IEC 84).

Response – The output of a device that results from a stimulus under specified conditions. For example, the response of a microphone is the output voltage resulting from an acoustic wave incident on the microphone (IEC 84).

Sound pressure level (SPL) – Given in decibels (dB), it is 20 times the logarithm to the base 10 of the ratio of a given sound pressure to the reference sound pressure, which is 20 micropascals (μPa) for airborne sound. The sound pressure is the root mean square value of the instantaneous sound pressure over a given time interval (IEC 84).

emporary threshold shift (S) – The temporary hearing loss suffered as the result of exposure to an acoustic wave. All or part of the loss is recovered during a given period of time after the exposure has been stopped (O1 75).

hreshold of hearinT – For a given listener, the minimum sound pressure level of a specified sound that is capable of evoking an auditory sensation. The sound reaching the ears from other sources is assumed to be negligible (IEC 84).

ransducer – A device capable of converting electrical energy to mechanical energy and reciprocally converting mechanical energy to electrical energy (IEC 86).

Ultrasonic – Utilizing, produced by or relating to ultrasonic waves or vibrations. For the purposes of this document, ultrasonic waves are acoustic waves having a frequency above 18 kHz. The limit value of 18 kHz was chosen as a compromise between the two values most commonly found in the literature, 16 and 20 kHz.

Upper sonic – Utilizing, produced by or relating to upper sonic waves or vibrations. For the purposes of this document upper sonic waves are acoustic waves in the frequency range between 10 and 18 kHz (Mi 74).

; ; ; efere

Ac 67 Acton, W.I., Carson, M.B. (1967). "Auditory and Subjective Effects of Airborne Noise from Industrial Ultrasonic Sources." Brit. J. Industr. Med., vol. 24, pp. 297-304.

Ac 68 Acton, W.I. (1968). "A Criterion for the Prediction of Auditory and Subjective Effects due to Airborne Noise from Ultrasonic Sources." Ann. Occup. Hyg., vol. 11, pp. 227-234.

Ac 74 Acton, W.I. (1974). "The Effects of Industrial Airborne Ultrasound on Humans." Ultrasonics, May, pp. 124-128.

Ac 75 Acton, W.I. (1975). "Exposure Criteria for Industrial Ultrasound." Ann. Occup. Hyg., vol. 18, pp. 267-268.

Ac 77 Acton, W.I., Hill, C.R. (1977). "Hazards of Industrial Ultrasound." Protection, vol. 14, no. 10, pp. 12-17.

Ac 83 Acton, W.I. (1983). "Exposure to Industrial Ultrasound: Hazards, Appraisal and Control." J. Soc. Occup. Med., vol. 33, pp. 107-113.

ACGIH (1989). Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices for 1988-1989. Available from the American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 6500 Glenway Ave., Bldg. D-7, Cincinnati, OH, U.S.A. 45211-4438.

Al 48 Allen, C.H., Frings, H., Rudnick, I. (1948). "Some Biological Effects of Intense High Frequency Airborne Sound." J. Acoust. Soc. Am., vol. 20, pp. 62-65.

An 86 André, G., Damongeot, A. (1986), "Émissions sonores et ultrasonores lors du soudage par ultrasons. Risques et moyens de prévention." Cahiers de notes documentaires (no. 123, 2nd trimester). Available from Institut national de recherche et de sécurité, 30, rue Olivier Noyer, 75680 Paris Cedex 14, France.

ANSI 83 American National Standards Institute (ANSI) Standard S1.4-1983. "Specification for Sound Level Meters." Available from Standards Secretariat, Acoustical Society of America, 335 East 45th Street, New York, NY, U.S.A., 10017-3483.

ANSI 85 American National Standards Institute (ANSI) Standard S1.4A-1985. "Amendment to ANSI S1.4-1983." Available from Standards Secretariat, Acoustical Society of America, 335 East 45th Street, New York, NY, U.S.A., 10017-3483.

Ca 86 Carnes, K.I., Dunn, F. (1986). "Low-Kilohertz-Water-Borne Ultrasound Biological Effects." Radiat. Environ. Biophys., vol. 25, pp. 235-240.

Cr 77 e, R.B., Forshaw, S.E. (1977). "Exposure to Ultrasonic Cleaner Noise in the Canadian Forces." DCIEM Technical Report #77X45. Available from DCIEM, 1133 Sheppard Ave. W., P.O. Box 2000, Downsview, Ontario M3M 3B9.

CSA 75 Canadian Standards Association (CSA) Standard Z107.5-1975. "Octave, Half-Octave and Third-Octave Band Filter Sets." Available from Canadian Standards Association, 178 Rexdale Blvd., Rexdale, Ontario M9W 1R3.

Da 48 Davis, H. (1948). "Biological and Psychological Effects of Ultrasonics." J. Acoust. Soc. Am., vol. 20, pp. 605-607.

Da 54 Danner, P.A., Ackerman, E., Frings, H.W. (1954). "Heating in Haired and Hairless Mice in High-Intensity Sound Fields from 6 - 22 kHz." J. Acoust. Soc. Amer., vol. 26, pp. 731-739.

Da 66 Dallos, P.J., Linnell, C.O. (1966). "Subharmonic Components in Cochlear-Microphonic Potentials." J. Acoust. Soc. Am., vol. 40, pp. 4-11.

Do 67 Dobroserdov, V.K. (1967). "The Effect of Low Frequency Ultrasonic and High Frequency Sound Waves on Workers." Hygiene and Sanitation, vol. 32, pp. 176-181.

El 49 Eldredge, D.H., Parrack, H.O. (1949). "Biological Effects of Intense Sound." J. Acoust. Soc. Am., vol. 21, p. 55.

FDA 8enter for Devices and Radiological Health, Food and Drug Administration (1981). "An Evaluation of Radiation Emission from Video Display Terminals." HHS Publication (FDA) 81-8153, Feb. 1981. Available from Division of Compliance, CDRH, Rockville, MD, U.S.A. 20857.

FDA 81(b) Herman, B.A., Powell, D. (1981). "Airborne Ultrasound: Measurement and Possible Adverse Effects." HHS Publication (FDA) 81-8163, May 1981. Available from CDRH, Rockville, MD, U.S.A. 20857.

Fe 84 Feller, A.M., Domres, B. (1984). "Cutaneous Gangrene and Osteonecrosis Resulting from Thermal Injuries Inflicted by Ultrasound." Akt. Traumatol. vol. 14, pp. 37-39.

Fi 68 Fishman, S.S. (1968). "Biological Effects of Ultrasound: In Vivo and In Vitro Haemolysis." Proceeding of the Western Pharmacology Society, vol. 11, pp. 149-150.

Gi 49 Von Gierke, H.E. (1949). "Sound Absorption at the Surface of the Body of Man and Animals." J. Acoust. Soc. Am., vol. 21, p. 55.

Gi 50 Von Gierke, H.E. (1950). "Subharmonics Generated in the Ears of Humans and Animals at Intense Sound Levels." Federation Proc., vol. 9, p. 130(a).

Gi 52 Von Gierke, H.E., Parrack, H.O., Eldredge, D.N. (1952). "Heating of Animals by Absorbed Sound Energy." J. Cellular Comp. Physiol., vol. 39, pp. 487-505.

Go 84 l)-T, R.E., Decker, T.N., Vance, A.D. (1984). "Acoustical Characterization and Efficacy Evaluation of Ultrasonic Pest Control Devices Marketed for Control of German Cockroaches." J. Econ. Entomology, vol. 77, pp. 1507-1512.

Gr 66 Grigor'eva, V.M. (1966). "Effect of Ultrasonic Vibrations on Personnel Working with Ultrasonic Equipment." Soviet Physics-Acoustics, vol. II, pp. 426-427.

Gr 80 Grzesik, J., Pluta, E. (1980). "Noise and Airborne Ultrasound Exposure in the Industrial Environment." Proc. 3rd Int. Congress on Noise as a Public Health Problem. Freyburg, W. Germany, September 25-29, 1978. ASHA Reports 10. The American Speech-Language-Hearing Association, Rockville, Maryland, April 1980, pp. 657-661.

Gr 83 Grzesik, J., Pluta, E. (1983). "High Frequency Hearing Risk of Operators of Industrial Ultrasonic Devices." Int. Arch. Occup. Environ. Health, vol. 53, pp. 77-78.

Gr 86 Grzesik, J., Pluta, E. (1986). "Dynamics of High-Frequency Hearing Loss of Operators of Industrial Ultrasonic Devices." Int. Arch. Occup. Environ. Health, vol. 57, pp. 137-142.

He 81 Herbertz, J., Grunter, K. (1981). "Untersuchungen zur hoerkurvenmaessigen Bewertung von Ultraschall in Luft." Fortschritte der Akustik -DAGA'81. Berlin: VDE-Verlag, pp. 509-512.

He 84 Herbertz, J. (1984). "Loudness of Airborne Ultrasonic Noise." Ultrasonics International (1983) Conference Proceedings, S.226-231.

IEC 66ational Electrotechnical Commission (IEC) Publication 225 (1966). "Octave, Half-Octave and Third Octave Band Filters Intended for the Analysis of Sounds and Vibrations." Available from Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale, 3, rue de Varembé, Geneva, Switzerland.

IEC 79 International Electrotechnical Commission (IEC) Publication 651 (1979). "Sound Level Meters." Available from Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale, 3, rue de Varembé, Geneva, Switzerland.

IEC 84 International Electrotechnical Commission (IEC) Publication 50(801) (1984). "Advance Edition of the International Electrotechnical Vocabulary. Chapter 801: Acoustics and Electroacoustics." Available from Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale, 3, rue de Varembé, Geneva, Switzerland.

IEC 86 International Electrotechnical Commission (IEC) Publication 854 (1986). "Methods of Measuring the Performance of Ultrasonic Pulse-Echo Diagnostic Equipment." Available from Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale, 3, rue de Varembé, Geneva, Switzerland.

IRPA 84 International Radiation Protection Association (IRPA) (1984). "Interim Guidelines on Limits of Human Exposure to Airborne Ultrasound." Health Physics, vol. 46, pp. 969-974.

Kn 68 Knight, J.J. (1968). "Effects of Airborne Ultrasound on Man." Ultrasonics, January, pp. 39-42.

Ma 85 Maur, A.N. (1985). "Limits of Exposure to Airborne Ultrasound." Ann. Am. Conf. Ind. Hyg., vol. 12, pp. 177-181.

Mi 74 Michael, P.L., et al. (1974). "An Evaluation of Industrial Acoustic Radiation above 10 kHz." Prepared for N.I.O.S.H. under contract No. HSM-99-72-125.

NCRP 83 NCRP Report #74 (1983). "Biological Effects of Ultrasound: Mechanisms and Clinical Implications." National Council on Radiation Protection and Measurements, 7910 Woodmont Avenue, Bethesda, MD, U.S.A. 20814.

Ne 80 Neppiras, E.A. (1980). "Acoustic Cavitation Thresholds and Cyclic Processes." Ultrasonics, September, pp. 201-209, 230.

Ol 75 Industrial Noise and Hearing Conservation (1975). J.B. Olishifski and E.R. Harford, eds. National Safety Council, 425 North Michigan Ave., Chicago, IL, U.S.A. 60611.

Pa 66 Parrack, H.O. (1966). "Effect of Air-borne Ultrasound on Humans." Internat. Audiol., vol. 5, pp. 294-308.

Ro 57 Romani, J.D., Bugard, P. (1957). "Nouveaux essais sur l'action des bruits sur le système endocrinien." Acustica, vol. 7, pp. 91-93.

Sh 75 Shoh, A. (1975). "Industrial Applications of Ultrasound – A Review. I. High-Power Ultrasound." IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, vol. SU-22, no. 2, pp. 60-71.

Sk 65ern, C. P. (1965). "Human Response to Measured Sound Pressure Levels from Ultrasonic Devices." Indust. Hyg. J., vol. 26, pp. 132-136.

Sw 82 Swiss Occupational Health and Safety Specifications (1982). "Ultrasonic Equipment as a Source of Noise." No. 137. Published by Schweizerische Unfallversicherungsenstalt, 6002 Lucerne, Switzerland.

USAF 76 United States Air Force (1976). Hazardous Noise Exposure. USAF Regulation 161-35.

WHO 88 Hill, C.R., ter Haar, G. (1988). "Ultrasound," in Non-Ionizing Radiation Protection, ed. M.J. Suess. Copenhagen: World Health Organization, Regional Publications.

Santé Canada Health Canada

Principes d'utilisation des ultrasons : partie II – applications industrielles et commerciales

Code de sécurité 24

Canada

Principes d'utilisation des ultrasons : partie II – applications industrielles et commerciales

Code de sécurité 24

Direction de l'hygiène du milieu
Direction générale de la protection de la santé

Publication autorisée par le ministre de la
Santé nationale et du Bien-être social

Also available in English under the title
Safety Code 24. Guidelines for the Safe Use of Ultrasound: Part II – Industrial and Commercial Applications

DHM-RT-158

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1991

En vente au Canada par l'entremise des

Librairies associées
et autres libraires

ou par la poste auprès du

Groupe Communication Canada – Édition
Ottawa (Canada) K1A 0S9

N° de catalogue H46-2/90-158F
ISBN 0-660-93088-9

Avant-Propos

Les ultrasons ont de nombreuses applications dans l'industrie, le commerce, le sectan militaire et à la maison. Il existe suffisamment d'indices de la nocivité de l'exposition aux ultrasons pour justifier la prudence dans leur utilisation. L'objet du présent document est de servir de guide aux opérateurs et d'établir des pratiques sûres dans les applications commerciales et industrielles des ultrasons. Les pratiques de sécurité et les mesures de protection recommandées sont basées sur des données, fuésentécs dans les pages qui suivent, concernant les effets sur la santé de l'exposition par contact aux ultrasons et de l'exposition aux ultrasons transmis dans l'air. Les normes d'exposition sont indiquées au tableau 5 de la section 4.2.1. Des renseignements supplémentaires sur la mesure de l'exposition aux ultrasons transmis dans l'air sont présentés à l'annexe 1.

Un document comme celui-ci ne peut traiter de toutes les applications possibles ou de toutes les situations d'exposition. Il ne peut non plus remplacer le bon sens dans des circonstances exceptionnelles, pour lesquelles il conviendra peut-être de modifier nos recommandations.

Ce document a été rédigé par Stephen Bly et Deirdre Morison, du Bureau de la radioprotection et des instruments médicaux. L'aide technique a été fournie par Robert Hussey et Judy Zohr.

Les personnes suivantes ont bien voulu revoir le texte. Nous avons tenu compte de leurs commentaires dans la rédaction du texte et nous désirons leur exprimer notre reconnaissance pour l'aide qu'elles nous ont ainsi apportée : E. Callary, D. Johnson et E.G. Létourneau, du Bureau de la radioprotection et des instruments médicaux; H.K. Lee, de la Sous-section de l'hygiène au travail, Direction générale des services médicaux, ministère de la Santé nationale et du Bien-être social; G.S.K. Wong, Section de l'acoustique et des normes mécaniques, Conseil national de recherches du Canada; D. Novitsky, Occupational Health Branch, Alberta; T.E. Dalgliesh, Department of Health and Fitness, Nouvelle-Écosse; K.L. Davies, ministère de la Santé et des Services communautaires, Nouveau-Brunswick; R.N. Ross, ministère de la Santé, Colombie-Britannique; M.E. Bitran, ministère du Travail, Ontario; J. Herbertz, Université de Duisburg (Allemagne de l'Ouest); F. Dunn, Université de l'Illinois à Urbana-Champaign; B. V. Seshagiri, Direction générale de la santé et de la sécurité au travail, Travail Canada; B. Pathak, Service des dangers physiques, Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail.

Les renseignements contenus dans le présent document n'y sont présentés qu'à titre indicatif. Pour tout problème d'interprétation du texte, veuillez entrer en communication avec la :

Section des rayonnements non ionisants
Bureau de la radioprotection et des instruments médicaux
Ministère de la Santé nationale et du Bien-être social
Ottawa (Ontario) Canada K1A 0L2

Table des matières

		Page
1.	**Introduction**	7
2.	**Effets sur la santé des ultrasons utilisés dans l'industrie ou dans le commerce**	10
2.1	Exposition par contact	10
2.2	Ultrasons transmis dans l'air	13
2.2.1	Réchauffement et cavitation	13
2.2.2	Effets sur l'ouïe – effets auditifs et physiologiques	14
2.2.3	Effets subjectifs	16
3.	**Exposition humaine aux ultrasons transmis dans l'air**	20
4.	**Principes de sécurité**	23
4.1	Ultrasons transmis par contact	23
4.2	Ultrasons transmis dans l'air	25
4.2.1	Limites d'exposition pour l'être humain	25
4.2.2	Mesures de protection contre l'exposition aux ultrasons transmis dans l'air	27
Annexe 1 – Mesure des ultrasons transmis dans l'air		29
Annexe 2 – Glossaire		34
Références		37

Liste des figures

Figure 1.	Résumé de données choisies sur les effets biologiques des faisceaux d'ultrasons sur les tissus des mammifères dans le bas de la gamme des MHz	11
Figure 2.	Effets physiologiques des ultrasons transmis dans l'air	19
Figure 3.	Panneau de mise en garde contre le rayonnement ultrasonore	24

Page

Liste des tableaux

Tableau 1. Applications industrielles des ultrasons de puissance élevée 8

Tableau 2. Niveaux de pression acoustique choisis, en dB, à la position de l'opérateur, pour une exposition à des sources ultrasonores industrielles, dans des bandes de tiers d'octave 21

Tableau 3. Niveaux de pression acoustique, en dB, pour divers appareils commerciaux 22

Tableau 4. Exemples de limites d'exposition professionnelle exprimées en niveaux de pression acoustique (dB) 26

Tableau 5. Lignes directrices canadiennes pour l'exposition aux ultrasons transmis dans l'air 27

1. Introduction

Les principes présentés ici, ainsi que les normes relatives aux limites d'exposition, visent à garantir la sécurité d'utilisation des ultrasons dans l'industrie et dans le commerce. Le domaine est vaste : les applications des ultrasons sont nombreuses et les techniques de production très diverses. Le tableau 1, extrait de Shoh (Sh 75) et Michael (Mi 74), dresse la liste des principales applications des ultrasons de puissance élevée, avec les fréquences ultrasonores et les gammes d'intensité correspondantes, ainsi qu'une brève description de l'application.

Les effets physiques et biophysiques des ultrasons de puissance élevée dépendent généralement des phénomènes complexes suivants provoqués par les vibrations dans le matériau :

1. cavitation et production de micro-courants dans les liquides;

2. instabilité superficielle aux interfaces liquide-liquide et liquide-gaz;

3. réchauffement et induction de fatigue dans les solides;

4. réchauffement des milieux liquides et assimilables à des liquides.

Dans les applications industrielles des ultrasons de puissance élevée, on expose l'objet ou la pièce à une énergie vibratoire suffisante pour opérer un changement physique permanent. Le principal danger pour l'utilisateur réside dans un contact accidentel avec l'onde ultrasonore. Cependant, nombre d'applications industrielles et commerciales des ultrasons produisent des niveaux de pression acoustique élevés dans l'air, dans la gamme des fréquences audibles et ultrasonores. Dans ce cas, il y a aussi un danger d'effet néfaste sur l'ouïe associé àl'exposition aux ultrasons transmis dans l'air.

Tableau 1.
Applications industrielles des ultrasons de puissance élevée [Extrait de Shoh (Sh 75) et Michael (Mi 74)]

Application	Description	Fréquence (kHz)	Intensité (W/cm^2)
Nettoyage et dégraissage	Cavitation d'une solution pour nettoyer les pièces immergées	20 - 50	Environ 1-6 W/cm^2 de surface exposée
Soudage et brasage	Déplacement d'une pellicule oxydée pour réaliser la soudure sans flux	-	1 -50 W/cm^2
Soudage des plastiques	Soudage des plastiques mous ou rigides	Environ 20	Environ 100 W/cm^2 à la soudure (700 W)
Soudage des métaux	Soudage de métaux semblables et non semblables	10 - 60	Environ 2000 W/cm^2 à la buse
Usinage	Tournage, broyage des surfaces à l'aide de boues abrasives, perçage à l'aide d'une action vibratoire	En général 20	
Extraction	Extraction d'essences, jus et produits chimiques de fleurs, fruits et plantes	Environ 20	Environ 500 W/cm^2 (100-500 watts)
Atomisation	Atomisation d'un combustible pour en améliorer le rendement de combustion et réduire la pollution; aussi, dispersion des métaux fondus	Entre 20 et 30	
Émulsification, dispersion et homogénéisation	Brassage et homogénéisation de liquides, boues et crêmes	-	-
Élimination de la mousse et dégazage	Séparation de la mousse et des gaz d'un liquide, réduction de la teneur en gaz et en mousse	-	-

Tableau 1 (suite)

Application	Description	Fréquence (kHz)	Intensité (W/cm^2)
Production de mousse dans les boissons	Déplacement de l'air par la mousse dans les bouteilles ou les contenants avant de les boucher	-	-
Électro-déposition	Augmentation de la vitesse de dépôt et production de revêtements plus denses et plus uniformes	-	-
Érosion	Test d'érosion par cavitation, ébavurage, arrachage	-	-
Séchage	Séchage des poudres, produits alimentaires et produits pharmaceutiques sensibles à la chaleur	-	-

Un certain nombre d'applications commerciales directes des ultrasons transmis dans l'air, comme les dispositifs d'alarme anti-vol, les systèmes d'ouverture automatique des portes, les convertisseurs pour câbloréception et les dispositifs de mise au point automatique en photographie, produisent également, dans certains cas, des niveaux de pression acoustique relativement élevés, dans la gamme des fréquences ultrasonores. Là encore, il y a des risques d'effets néfastes sur l'ouïe.

Pour tenir compte des différences entre les deux types de danger, nous énoncerons séparément les principes de sécurité et les lignes directrices s'appliquant àl'exposition par contact et à l'exposition aux ultrasons transmis dans l'air.

2. Effets sur la santé des ultrasons utilisés dans l'industrie ou dans le commerce

2.1 Exposition par contact

Il y a exposition par contact lorsqu'il n'y a pas de couche d'air entre le transducteur et le tissu. Cette exposition peut avoir lieu par contact direct et intime entre le transducteur et le tissu ou par couplage liquide ou solide. Dans certains cas, lors d'une exposition par contact, le transfert d'énergie du transducteur au tissu peut atteindre presque 100 p. 100. Par contre, la présence d'une couche d'air peut réduire le transfert d'énergie ultrasonore par des facteurs de l'ordre de plusieurs puissances de dix. Par exemple, si une personne plonge un doigt dans le bain d'un humidificateur à ultrasons, l'énergie transférée à l'os lors de cette exposition directe est de l'ordre de 65 p. 100 de l'énergie rayonnée; par contre, si la personne tient son doigt juste au-dessus de l'eau, l'énergie ultrasonore transférée au doigt est un million de fois plus faible.

Des données choisies sur les effets biologiques de l'exposition par contact aux ultrasons sur les tissus des mammifères sont résumées sur le graphique de la figure 1 (NCRP 83). Les courbes représentent les intensités au-dessous desquelles aucun effet biologique important confirmé indépendamment n'a été observé.

Des appareils tels que les humidificateurs à ultrasons, fonctionnant à des fréquences de quelques MHz seulement, peuvent provoquer des lésions tissulaires *si et seulement si* il y a exposition par contact. Certains incidents ont été signalés et l'on sait que, lorsque l'humidificateur à ultrasons fonctionne à pleine puissance, l'exposition par contact d'un doigt au faisceau ultrasonore provoquera une douleur aiguë en quelques secondes seulement, due probablement à un réchauffement excessif de l'os.

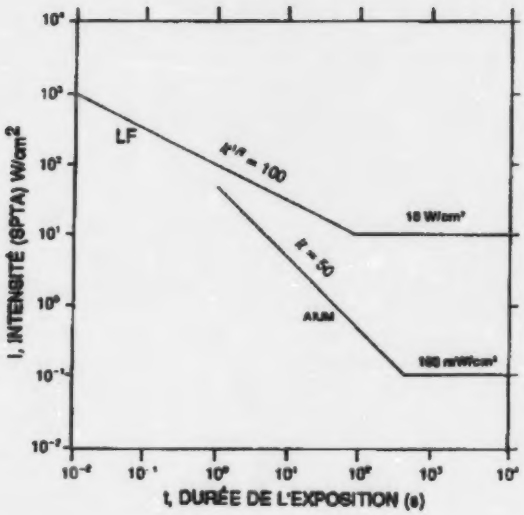


Figure 1.
Graphique représentant les intensités au-dessous desquelles aucun effet biologique important confirmé indépendamment n'a été observé dans les tissus des mammifères. La courbe supérieure (LF) s'applique aux lésions focales; les valeurs des intensités sont des valeurs in situ. La courbe inférieure (AIUM) est une représentation graphique de la déclaration relative aux effets biologiques des ultrasons sur les mammifères exposés in vivo du Bioeffects Committee de l'American Institute for Ultrasound in Medicine (AIUM). Les fréquences ultrasonores se situent dans la gamme de 1 à 10 MHz et les intensités de crête dans l'espace moyennes dans le temps, I(SPTA), sont mesurées dans l'eau (NCRP 83).

Les ultrasons de puissance élevée présentent aussi un danger à des fréquences inférieures au MHz. Par exemple, on utilise des ondes ultrasonores de grande puissance dans les appareils de nettoyage et les désintégrateurs de cellules ultrasonores en raison de leurs effets violents et destructeurs. Il est fort probable que le bain (eau ou solvant) de ces appareils soit le siège d'une cavitation relativement intense (AC 83; OMS 88). Néanmoins, les cas signalés de lésions

tissulaires sont rares. Un rapport fait état de douleurs aux mains chez des volontaires qui s'étaient exposés aux faisceaux ultrasonores émis par des appareils de nettoyage fonctionnant à des fréquences comprises entre 20 et 40 kHz. Toutefois, aucun effet immédiat n'a été observé lors d'une exposition àun faisceau ultrasonore de 80 kHz (Fi 68) émis par un appareil de nettoyage.

Dans deux études sur les dangers des ultrasons utilisés dans l'industrie (Ac 77, Ac 83), Acton a été incapable de confirmer qu'une exposition continue à un faisceau ultrasonore par couplage liquide pouvait entraîner une nécrose ou une dégénérescence de l'os. Par ailleurs, selon une étude récente menée par Carnes et Dunn (Ca 86), des lésions testiculaires ont été observées chez seulement 4 souris parmi les 150 exposées à un faisceau ultrasonore émis par un homogénéisateur de tissus de 25 kHz fonctionnant àune intensité de 15 W/cm^2.

La documentation qui existe sur des appareils tels que les appareils de nettoyage à ultrasons et les homogénéisateurs de tissus porte à confusion : ces appareils ne semblent pas aussi dangereux qu'on pourrait s'y attendre, compte tenu des effets visés. Cependant, bien que l'on signale très peu d'effets biologiques, l'exposition aux ultrasons transmis dans un liquide, émis par ces appareils, peut effectivement provoquer des lésions et il convient de prendre des mesures de protection.

La documentation sur les dangers d'appareils tels que les machines à souder est encore plus rare. Néanmoins, un rapport récent (Fe 84) fait état d'une brûlure consécutive à une exposition par contact à un faisceau ultrasonore émis par une machine utilisée pour le soudage des matières plastiques, fonctionnant à une fréquence de 20 kHz. L'exposition n'a duré qu'une fraction de seconde, mais elle a été suffisante pour causer une grave brûlure localisée au doigt de l'opérateur.

Les appareils ultrasonores industriels sont conçus de façon que les personnes qui travaillent avec ces appareils ne soient pas exposées, directement ou par couplage liquide ou solide, aux transducteurs émettant des faisceaux ultrasonores de puissance élevée (ou de grand intensité). Cependant, un contact direct, à la suite d'un accident ou d'une négligence, est toujours possible. Il est donc important de prendre toutes les précautions nécessaires pour éviter une exposition accidentelle.

2.2 Ultrasons transmis dans l'air

On a commencé à se préoccuper des effets possibles de l'exposition au rayonnement ultrasonore ou aux fréquences audibles supérieures[1] transmis dans l'air à la fin des années 40, à la suite de la publication de certains rapports signalant des malaises dus aux ultrasons chez les personnes travaillant à proximité des avions à réaction (Da 48). On a alors entrepris des études sur les effets biologiques des ultrasons transmis dans l'air (effets sur l'ouïe et effets ne touchant pas l'ouïe).

2.2.1 Réchauffement et cavitation

Les mécanismes les plus plausibles des effets des ultrasons transmis dans l'air sur l'être humain, autres que les effets sur l'ouïe, sont le réchauffement et la cavitation. D'après les exemples de seuils de cavitation donnés par Neppiras (Ne 80), les ultrasons transmis dans l'air ne devraient pas donner lieu au phénomène de cavitation lorsque le niveau de pression acoustique est inférieur à environ 190 dB. Cette valeur est bien supérieure aux niveaux de pression acoustique auxquels il se produit un réchauffement.

Un certain nombre d'études sur les effets des ultrasons transmis dans l'air ont été entreprises sur des mammifères et des insectes. Les effets observés ont été attribués au réchauffement. À 160 dB[2] et 20 kHz, Allen et coll. (Al 48) ont signalé la mort d'insectes et de souris à la suite d'expositions dont les durées variaient de 10 secondes à 3 minutes. Dans ces expériences, il a été établi que le réchauffement dû à l'absorption de l'énergie sonore était suffisant pour provoquer la mort. Parrack et ses collègues ont démontré que, aux fréquences ultrasonores, la majeure partie de l'absorption d'énergie observée dans les études avec les rats était due au poil des rats (Gi 49, Gi 52, Pa 66). Le rapport entre l'énergie absorbée et l'énergie incidente pour le corps humain était dix fois plus faible que pour un rat tondu. Danner et coll. (Da 54) ont trouvé que le seuil de réchauffement se situait à un NPA de 144 dB pour une souris avec son poil et de 155 dB pour une souris tondue, à des fréquences de 18-20 kHz. D'après ces résultats, le NPA devrait être d'au moins 155 dB pour qu'il y ait une

1. Voir la signification de ce terme dans le glossaire (Annexe 2).

2. Dans l'air, la conversion entre le niveau de pression acoustique, NPA, en dB, et l'intensité, I, en W/cm^2, est donnée par I2 - $10^{((NPA-160)/10)}$. Un NPA de 160 dB correspond donc à une intensité de 1 W/cm^2.

élévation de température rapide et nocive chez les êtres humains et, d'après les calculs de Parrack (Pa 66), le niveau de pression acoustique létal pour les êtres humains serait de 180 dB.

On peut trouver d'autres renseignements sur le réchauffement dû aux ultrasons chez les êtres humains dans le rapport publié par Allen et coll. (Al 48). Ce rapport fait état d'expositions à un niveau de pression acoustique de 165 dB. A ce niveau, le réchauffement local dans les fentes entre les doigts a causé des brûlures presque instantanément. On a observé un réchauffement douloureux après plusieurs secondes d'exposition de surfaces plus étendues telles que la paume de la main. Par ailleurs, Acton (Ac 74) fait état de travaux non publiés réalisés par Parrack, selon lesquels on a observé un léger réchauffement des plis de la peau à des niveaux de pression acoustique situés entre 140 et 150 dB. Parmi les autres effets ne touchant pas l'ouïe à ces niveaux élevés, on note des sensations extrêmement désagréables dans les conduits nasaux.

Nous pouvons donc conclure que, à des niveaux de pression acoustique supérieurs à environ 155 dB, l'exposition àdes ultrasons transmis dans l'air provoquera des effets nocifs aigus chez l'être humain, dus principalement àl'absorption de l'énergie sonore et au réchauffement subséquent. Il est probable que des expositions prolongées chroniques à des niveaux compris entre 145 et 155 dB soient également nocives car elles pourraient élever la température du corps à des niveaux correspondant à une fièvre légère pendant les périodes d'exposition. Cependant, comme il est indiqué dans la section 3, ces niveaux de pression acoustique élevés n'ont jamais été observés à proximité des appareils commerciaux ou industriels.

2.2.2 Effets sur l'ouïe – effets auditifs et physiologiques

Les principaux effets des ultrasons transmis dans l'air que l'on peut observer en pratique sont associés à la réception des ondes ultrasonores par l'oreille. Les effets se classent en deux grandes catégories : les effets dits «subjectifs» sur le système nerveux central et les lésions de l'oreille. Les normes d'exposition sont principalement basées sur ces effets car ils se produisent à des niveaux de pression acoustique inférieurs aux niveaux qui entraînent un réchauffement.

Deux rapports font état d'une perte d'audition temporaire à des fréquences inférieures à 8 kHz, à la suite d'une exposition à des ultrasons transmis dans l'air avec un niveau de pression acoustique élevé. Parrack (Pa 66) a observé que, pour des expositions de cinq minutes à des fréquences choisies entre 17 et 37 kHz, à des niveaux

de pression acoustique situés entre 148 et 154 dB, la sensibilité auditive était réduite aux fréquences sous-harmoniques. Des pertes légères d'audition se produisaient à l'occasion à la troisième sous-harmonique. Les personnes atteintes retrouvaient rapidement toute leur sensibilité. Dobroserdov (Do 67) a mesuré les réductions de sensibilité auditive à des fréquences de 4, 10, 14 et 15 kHz après une exposition d'une heure à des ultrasons de 20,6 kHz, à un niveau de pression acoustique de 120 dB. Il n'a observé aucun effet important lors d'expositions à des niveaux de pression acoustique de 100 dB.

On ne possède pas de preuves que des niveaux de pression acoustique inférieurs à 120 dB, à des fréquences ultrasonores, peuvent entraîner des pertes d'audition. Dans une étude portant sur 18 hommes travaillant avec des appareils de nettoyage et autres instruments à ultrasons, Knight (Kn 68) n'a découvert aucune preuve de perte d'audition attribuable à une exposition aux ultrasons. Dans une étude de 31 oreilles chez 16 sujets exposés à des niveaux de pression acoustique atteignant 110 dB dans les bandes de tiers d'octave centrées sur 20 et 25 kHz, Acton et Carson (Ac 67) n'ont observé aucun déplacement temporaire de seuil (TTS). Grigor'eva (Gr 66) a exposé cinq volontaires à un son pur de 20 kHz à 110-115 dB pendant une heure et n'a constaté aucune modification de la sensibilité auditive (ni du pouls ou de la température de la peau). Cependant, Grigor'eva a apparemment observé un déplacement temporaire de seuil lors d'expositions à des sons purs de 16 kHz pour des niveaux de pression acoustique supérieurs à 90 dB.

Récemment, Grzesik et Pluta (Gr 83) ont étudié l'ouïe de 55 opérateurs d'appareils à nettoyer et à souder ultrasonores. Ils n'ont observé aucune différence dans les seuils d'audition entre les personnes exposées et les témoins à des fréquences comprises entre 0,5 et 8 kHz. Toutefois, ils font état de différences d'audition significatives entre les sujets exposés et les témoins dans la plage de 10-20 kHz. Ils ont noté des élévations de seuil et un nombre décroissant de sujets répondant à des stimuli dans la plage supérieure des fréquences audibles. Dans une étude de suivi sur 26 de ces travailleurs, Grzesik et Pluta (Gr 86) ont conclu que l'exposition professionnelle de ces travailleurs aux champs acoustiques créés par les appareils à nettoyer et à souder ultrasonores entraînait une perte d'audition d'environ 1 dB/an dans la plage de fréquences de 13-17 kHz. Les spectres acoustiques de ces appareils (Gr 80, Gr 83) montrent que les niveaux de pression acoustique se situent entre 80 et 102 dB à des fréquences comprises entre 10 et 18 kHz (fréquences audibles supérieures) alors qu'ils se situent entre 100 et 116 dB à des fréquences supérieures à 20 kHz. En l'absence d'une corrélation directe entre les

spectres acoustiques et les effets mesurés sur l'audition, il est impossible de définir avec certitude les fréquences responsables des pertes d'audition aux fréquences élevées. Toutefois, il est plus probable que ce soit les fréquences audibles supérieures, et non le rayonnement ultrasonore, qui aient entraîné les pertes d'audition mesurées dans ces études puisque les niveaux de pression acoustique élevés étaient plus fréquents dans la plage des fréquences audibles supérieures que dans la plage des fréquences ultrasonores (Gr 80, Gr 83). Par ailleurs, comme il est mentionné ci-dessus, on a apparemment observé des déplacements temporaires de seuil chez des sujets exposés à des sons purs dans la gamme des fréquences audibles supérieures, entre 10 et 16 kHz, avec des niveaux de pression acoustique supérieurs à 90 dB. En outre, il n'y a pas d'autres preuves bien établies d'effets sur l'audition à des niveaux de pression acoustique ultrasonores inférieurs à 120 dB.

D'autres effets physiologiques des ultrasons transmis dans l'air risquent de se produire seulement à des niveaux de pression acoustique supérieurs ou égaux aux niveaux provoquant un déplacement temporaire de seuil. Knight (Kn 68) et Grigor'eva (Gr 66) n'ont trouvé aucune preuve d'effets physiologiques à des fréquences ultrasonores. Dobroserdov (Do 677) a observé une perte importante d'équilibre et une réduction du temps de réponse motrice lors d'exposition à des niveaux de pression acoustique de 120 dB à 20 kHz, mais les effets étaient négligeables à 100 dB, à la même fréquence.

2.2.3 Effets «subjectifs»

On a signalé un certain nombre d'effets «subjectifs» des ultrasons transmis dans l'air, dont de la fatigue, des maux de tête, des nausées, des acouphènes et une perturbation de la coordination neuro-musculaire [Sk 65, Ac 67, Ac 68, Cr 77, FDA 81 (b)]. Skillern (Sk 65) a mesuré les spectres de bande de tiers d'octave de 10 à 31,5 kHz pour un certain nombre d'appareils à ultrasons et il a observé que les effets subjectifs étaient associés aux appareils qui produisaient des niveaux de pression acoustique supérieurs à 80 dB dans la gamme de fréquences considérée.

Acton et Carson (Ac 67) ont étudié les effets des ultrasons sur 18 jeunes femmes travaillant près d'une batterie de nettoyeurs «ultrasonores». Les sujets, exposés aux ultrasons et à l'énergie acoustique audible, se plaignirent de fatigue, de maux de tête, de nausée et d'acouphènes. Ces constatations furent confirmées par des expériences de laboratoire subséquentes dans lesquelles des sujets humains furent exposés à un rayonnement acoustique haute fréquence, dont une partie était audible. Les mêmes sujets exposés à des énergies

hautes fréquences de même niveau, mais sans composante audible, n'eurent rien à signaler. Acton et Carson conclurent que les sujets devaient être exposés à des fréquences audibles pour que l'on observe des effets subjectifs. À l'appui de cette conclusion, ils notèrent que les femmes se plaignaient plus de ces effets que les hommes. Puisque les hommes exposés lors de leurs expériences étaient plus âgés et avaient tous été exposés au bruit (ils avaient perdu une certaine sensibilité auditive aux hautes fréquences), il était raisonnable de supposer que le rayonnement était en grande partie inaudible pour nombre d'entre eux.

Une analyse détaillée des données d'Acton et Carson a montré qu'il n'y avait pas d'effets subjectifs si les niveaux de pression acoustique dans les bandes de tiers d'octave étaient inférieurs à 75 dB pour des fréquences centrales inférieures ou égales à 16 kHz et à 110 dB pour des fréquences centrales supérieures ou égales à 20 kHz (Ac 68). Acton fit remarquer que ce critère relatif à l'apparition d'effets subjectifs concordait avec les données de Skillern (Sk 65) et il proposa de le choisir comme norme d'exposition. Acton modifia la norme en 1975 (Ac 75). Dans la norme révisée, la limite de 75 dB a été étendue pour inclure la bande de tiers d'octave centrée sur 20 kHz. Cette modification a été apportée après la publication d'autres rapports sur les effets subjectifs. Acton observa que des effets subjectifs pouvaient encore se produire en dessous de 110 dB dans la bande de tiers d'octave centrée sur 20 kHz (Ac 75). Il expliqua cette observation par le fait que les limites de fréquence nominales de la bande de tiers d'octave centrée sur 20 kHz sont égales à 17,6 kHz et 22,5 kHz. La limite inférieure de cette bande de fréquences se situait dans la partie supérieure de la gamme des fréquences audibles d'une grande partie de la population et, par conséquent, des effets subjectifs pouvaient encore se produire à des niveaux relativement bas.

Dans leur ensemble, les résultats des études sur les effets subjectifs montrent que ces effets constituent une réaction du système nerveux central aux fréquences audibles supérieures ou aux ultrasons lorsque ces derniers deviennent audibles. La forme du critère obtenu empiriquement par Acton semble indiquer que les ultrasons peuvent devenir audibles si les niveaux de pression acoustique sont suffisamment élevés et que le seuil d'audition s'élève rapidement lorsqu'on passe des fréquences audibles supérieures aux fréquences ultrasonores. Ce résultat est, qualitativement, en accord avec les niveaux de pression acoustique en champ libre correspondant au seuil d'audition moyen mesurés par Herbertz et Grunter (He 81, He 84) pour les fréquences audibles et ultrasonores situées entre 10 et 31,5 kHz. Des moyennes de leurs valeurs ont été calculées dans deux études

distinctes menées sur un total de 30 sujets possédant une audition normale, âgés de 20 à 41 ans. Le seuil moyen d'audition augmentait rapidement et de façon monotone avec la fréquence à raison de 12 dB par kHz environ entre 14 et 20 kHz, avec un seuil d'audition moyen d'approximativement 100 dB à 20 kHz (He 84) et 125 dB à25 kHz. Au-dessus de 20 kHz, les ultrasons peuvent sembler audibles en raison de la production de sous-harmoniques dans l'oreille (Gi 50). Ce phénomène a été observé à des niveaux supérieurs à 110 dB chez le chinchilla et le cobaye (Da 66). L'hypothèse que les ultrasons semblent audibles en raison de la production de sous-harmoniques dans l'oreille est aussi en accord avec l'étude de Parrack susmentionnée, dans laquelle une perte d'audition à court terme avait été observée à des sous-harmoniques des fréquences du rayonnement après une exposition à des ultrasons transmis dans l'air avec des niveaux de pression acoustique élevés (Pa 66).

En résumé, l'exposition à un rayonnement ultrasonore suffisamment intense semble provoquer un syndrome se manifestant par des nausées, des maux de tête, des acouphènes, des douleurs, une sensation de vertige et de la fatigue. La nature et l'ampleur des symptômes semblent varier selon le spectre réel du rayonnement ultrasonore et la sensibilité particulièze de la personne exposée, plus particulièrement son acuité auditive aux hautes fréquences.

Acton a publié un résumé concis des effets physiologiques des ultrasons dans des conditions d'exposition précises. Ce résumé est présenté sous forme modifiée à la figure 2 (Ac 74).

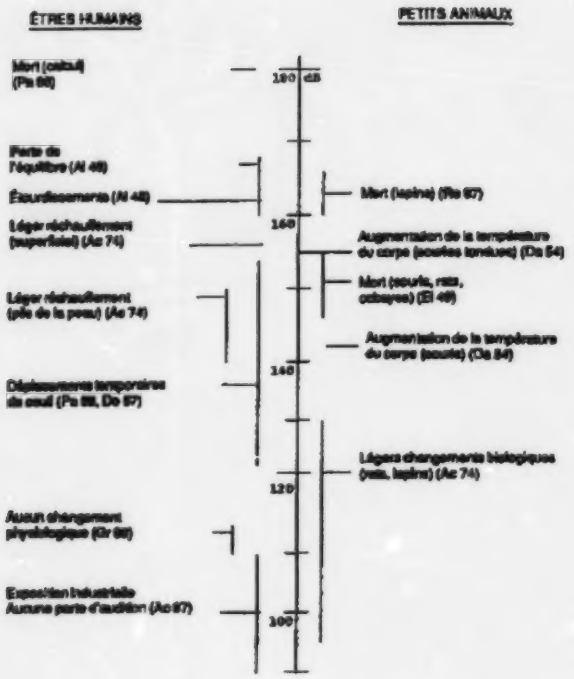


Figure 2.
Effets physiologiques des ultrasons transmis dans l'air
(Adaptation du résumé publié par Acton (Ac 74)).

3. Exposition humaine aux ultrasons transmis dans l'air

Un certain nombre d'études ont été menées et plusieurs rapports ont été publiés sur l'exposition des travailleurs aux ultrasons transmis dans l'air (Sk 65, Pa 66, Mi 74, Ac 67, Do 67, Gr 80, Sw 82, An 86). Les valeurs des niveaux de pression acoustique obtenues varient considérablement suivant l'appareil, l'emplacement où la mesure a été effectuée par rapport à l'appareil et la présence ou l'absence de protection. Des exemples choisis de niveaux de pression acoustique, mesurés à la position de l'opérateur, sont donnés dans le tableau 2.

Grzesik et Pluta (Gr 80, Gr 83) ont mesuré les niveaux de pression acoustique dans des bandes de tiers d'octave àla position de l'opérateur, produits par des appareils de nettoyage ultrasonores fonctionnant à des fréquences de 25 et 28 kHz ainsi qu'à des fréquences sous-harmoniques de 12,5 et 14 kHz. Les niveaux de pression acoustique aux fréquences fondamentales se situaient entre 100 et 116 dB et les sous-harmoniques avaient des NPA de 80-102 dB. Avec les machines à souder ultrasonores, la fréquence moyenne était de 21 kHz et le NPA maximal était de 106 dB dans la bande de tiers d'octave centrée sur 20 kHz. Les résultats obtenus au cours des 25 dernières années sont, dans leur grande majorité, en accord avec l'assertion de Grigor'eva selon laquelle les niveaux de pression acoustique produits par des machines ultrasoniques dans la gamme des fréquences ultrasonores dépassent rarement 120 dB (Gr 66).

Depuis 1976, un certain nombre de mesures des NPA du rayonnement ultrasonore transmis dans l'air produits par des appareils commerciaux a été réalisé par le Bureau de la radioprotection et des instruments médicaux (BRPIM) au Canada et par le Center for Devices and Radiological Health (CDRH) de la Food and Drug Administration (FDA) aux États-Unis. Le tableau 3 contient plusieurs exemples des NPA maximaux observés pour des positions typiques de l'opérateur. Étant donné que ces appareils émettent des sons purs, les valeurs correspondant aux bandes latérales ne sont pas indiquées. Les appareils commerciaux émettent habituellement des sons purs uniques (bien que des balayages de fréquences soient parfois utilisés) et les niveaux de pression acoustique ont tendance à être inférieurs à ceux observés dans les cas d'exposition à des appareils industriels.

Tableau 2
Niveaux de pression acoustique choisis, en dB, àla position de l'opérateur pour une exposition à des sources ultrasonores industrielles, dans des bandes de tiers d'octave

Référence	Appareil Ultrasonore	Fréquence au centre de la bande de tiers d'octave (kHz)					
		10	12,5	16	20	25	31,5
(Sk 65)	Perceuse (sans protection)	91	85	90	81	108	84
(Sk 65)	Machine à souder	76	95	115	93	73	69
(Sk 65)	Appareil à nettoyer	<61	<61	<61	83	67	<61
(Sk 65)	Appareil à nettoyer	77	78	79	96	77	77
(Pa 66)	Moteur à réaction (Post-combustion)	114	113	11	108	106	103
(Cr 77)	Appareil à nettoyer	86	77	86	105	97	80
(Ac 67)	Perceuse	75	67	75	97	75	78
(Ac 67)	Appareil à nettoyer (petit)	53	61	91	83	75	102
(Ac 67)	Appareil à nettoyer (grand)	83	86	91	96	91	102
(An 86)	Machine à souder	S.O.	S.O.	S.O.	127	S.O.	S.O.
(An 86)	Machine à souder	S.O.	S.O.	S.O.	106	S.O.	S.O.
(Sw 82)	Appareil à nettoyer	78	66	76	97	74	70
(Sw 82)	Machine à souder (sans protection)	106	114	119	96	80	56

Tableau 3
Niveaux de pression acoustique, en dB, pour divers appareils commerciaux

Référence	Appareil Ultrasonore	Fréquence au centre de la bande de tiers d'octave (kHz)						
		10	12,5	16	20	25	31,5	40
BRPIM	Terminaux à écran de visualisation	-	-	66	-	-	-	-
CDRH(a)	Terminaux à écran de visualisation	-	-	61	-	-	-	68
BRPIM	Capteur ultrasonore de présence humaine	-	-	-	-	94	-	-
CDRH(b)	Appareil d'alarme ultrasonore	-	-	-	93	-	-	-
CDRH(b)	Appareil ultrasonore pour repousser les chiens	-	-	108	-	-	-	-

(a) Extrait de [FDA 81(a)]. Les résultats pour deux terminaux à écran de visualisation fonctionnant à des fréquences très différentes sont indiqués.
(b) Extrait de [FDA 81(b)]. La position où l'exposition est mesurée pour l'appareil ultrasonore à repousser les chiens n'est pas la position normale, dans le cas présent (à cinq pieds devant l'appareil). Dans la plupart des cas, c'est le chien, et non un être humain, qui se trouve dans cette position.

En résumé, l'exposition à des appareils ultrasonores industriels dépasse rarement 120 dB. L'exposition à des appareils commerciaux conçus pour émettre des ultrasons dépasse rarement 110 dB. Les appareils commerciaux qui émettent accidentellement des ultrasons, tels que les terminaux à écran de visualisation, produisent des niveaux de pression acoustique à l'oreille de l'opérateur inférieurs à 70 dB et très rarement supérieurs à 65 dB.

Les appareils ultrasonores industriels produisent également des sons audibles. Il convient de ne pas ignorer ces expositions à des fréquences audibles lorsqu'on évalue les dangers des appareils ultrasonores industriels. Il est amplement prouvé dans les études mentionnées dans la section 2 que, à des niveaux de pression acoustique équivalents, les fréquences audibles émises par les appareils à ultrasons sont beaucoup plus dangereuses que les fréquences ultrasonores.

4. Principes de sécurité

4.1 Ultrasons transmis par contact

L'exposition par contact à des ultrasons de puissance élevée doit être évitée à tout prix.

Nous recommandons les mesures suivantes pour garantiz la sécurité d'utilisation des ultrasons de puissance élevée, généralement employés dans le but de provoquer un changement physique permanent dans un système :

1. Occupation limitée –
   Seuls les opérateurs habilités à utiliser du matériel à ultrasons de puissance élevée ou des personnes bien encadrées peuvent se trouver à l'intérieur de l'enceinte réservée au matériel pendant son fonctionnement.
2. Responsabilité du personnel –
   Le personnel utilisant des appareils à ultrasons de puissance élevée et les inspecteurs de sécurité industrielle doivent connaître les effets néfastes possibles des ultrasons ainsi que les mesures de protection nécessaires.
3. Panneaux de mise en garde –
   Le panneau de mise en garde contre le rayonnement ultrasonore que nous recommandons est montré à la figure 3. Ces panneaux doivent être posés à l'entrée de toute zone qui contient du matériel à ultrasons de puissance élevée ou sur chaque appareil à ultrasons de puissance élevée. Ils doivent être accompagnés d'une note appropriée indiquant les précautions à prendre pendant le fonctionnement de l'appareil.
4. Cuves de nettoyage à ultrasons –
   Toutes les cuves de nettoyage à ultrasons doivent porter une étiquette indiquant qu'il faut veiller à ce que les mains ou aucune autre partie du corps ne soient immergées dans la cuve pendant son fonctionnement.

ULTRASONS

DANGER

Figure 3.
Panneau de mise en garde contre le rayonnement ultrasonore.

Pour les grandes cuves de nettoyage, qu'il est difficile d'arrêter pour retirer ou introduire les objets, on peut suspendre ces derniers à des crochets ou dans des paniers. S'il est impossible de prendre ces mesures de protection et s'il faut absolument immerger les mains ou les bras, on doit, en dernier recours, utiliser des gants doublés de fourrure ou de bourrure de laine. Ces gants offrent une protection adéquate puisque la couche d'air emprisonnée provoque un désaccord d'impédance acoustique suffisant pour réduire l'énergie ultrasonore transmise au corps. Cependant, les gants doivent être suffisamment longs et en bon état (Ac 77), car toute défectuosité dans cette couche d'air supprimerait la protection.

5. Autres appareils à ultrasons de puissance élevée –
Toute appareil à ultrasons de puissance élevée pouvant d'exposer par contact une personne aux ultrasons émis doit porter une étiquette précisant que l'appareil ou une certaine partie de l'appareil ne doit pas être touché pendant son fonctionnement. Là où c'est nécessaire, les sources solides d'ultrasons peuvent être manipulées avec des outils appropriés.
Les niveaux utilisés dans les appareils à ultrasons de faible puissance sont tels que les risques de subir des lésions par contact sont minimes. Cependant, puisque les données dont nous disposons sur les effets biologiques ne sont pas concluantes, il convient d'éviter le plus possible les expositions par contact.

4.2 Ultrasons transmis dans l'air

4.2.1 Limites d'exposition pour l'être humain

Les études sur les effets biologiques des ultrasons décrites à la section 2 ont donné lieu à des interprétations et des analyses légèrement différentes. Cependant, plusieurs pays sont arrivés à des recommandations similaires en ce qui concerne l'exposition de l'être humain aux fréquences audibles supérieures et ultrasonores. Ces recommandations sont résumées au le tableau 4 (Ma 85).

Deux autres normes, relativement différentes, ont aussi été proposées. L'U.S. Air Force (USAF 76) a fixé une limite de 85 dB pour chaque bande de tiers d'octave de 12,5 à40 kHz. Si l'on fait des comparaisons avec certains spectres de Skillern et Acton pour lesquelles on observe des effets subjectifs, ces limites peuvent sembler trop élevées dans les bandes centrées sur 16 et 20 kHz pour protéger adéquatement contre les effets subjectifs et trop strictes dans les bandes centrées sur 25 et 40 kHz. L'autre norme a été proposée par auf der Maur dans son article (Ma 85). Cette norme, basée sur le filtre pondéré AU proposé par Herbertz (He 84), a apparemment été prise en considération par plusieurs organismes. Cependant, les niveaux élevés autorisés, par exemple 105 dB dans la bande centrée sur 16 kHz, 120 dB dans la bande centrée sur 20 kHz et 140 dB dans la bande centrée sur 31,5 kHz, semblent excessivement élevés lorsqu'on tient compte des données sur les effets subjectifs. Par ailleurs, les niveaux permis par cette norme dans les bandes centrées sur 16 et 20 kHz sont supérieurs ou égaux aux niveaux pour lesquels Grigor'eva et Dobroserdov ont observé des déplacements temporaires de seuil chez leurs sujets exposés (Gr 66, Do 67). La valeur de 140 dB se situe à la limite inférieure de la plage dans laquelle un léger réchauffement des plis de la peau a été signalé (Ac 74).

À l'heure actuelle, la norme par tiers d'octave modifiée d'Acton semble être la plus appropriée pour définir des limites d'exposition. Elle est basée sur la comparaison la plus exhaustive des spectres par bande de tiers d'octave qui ait été publiée ainsi que sur la présence d'effets subjectifs.

Les recommandations canadiennes en matière de limites d'exposition sont indiquées au tableau 5. Ces limites sont données dans des bandes de tiers d'octave dont la fréquence médiane varie de 16 kHz à 50 kHz. Les limites d'exposition sont indépendantes de la durée car les effets subjectifs peuvent apparaître presque immédiatement (AIRP 84). En dessous de la bande de tiers d'octave centrée sur 16 kHz, le son doit être clairement classé comme audible et il doit

être évalué à l'aide des critères établis dans les lois et règlements fédézaux et fuovinciaux ou églements nuncipaux existrants sur le bruit. La grande différence entre la bande de tiers d'octave centrée sur 20 kHz et la bande de tiers d'octave centrée sur 25 kHz est basée sur l'analyse empirique de données d'exposition industrielle réalisée par Acton. Cette différence est en accord, qualitativement, avec l'élévation abrupte du seuil d'audition moyen mesurée par Herbetz et Grunter (He 81, He 84), qui passe d'environ 75 dB à 17,5 kHz à 115 dB à 22,5 kHz.

Tableau 4
Exemples de limites d'exposition professionnelle exprimées en niveaux de pression acoustique (dB). Les niveaux de pression acoustique sont mesurés dans des bandes de tiers d'octave

					Proposée par *	
Fréquence kHz	1	2	3	4	5	6
8	90	75	-	-	-	-
10	90	75	-	-	80	-
12,5	90	75	75	-	80	-
16	90	75	85	-	80	-
20	110	75	110	105	105	75
25	110	110	110	110	110	110
31,5	110	110	110	115	115	110
40	110	110	110	115	115	110
50	110	-	110	115	115	110

*Légende:
1. Japon (1971)
2. Acton (1975)
3. URSS (1975)
4. Suède (1978)
5. American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH 89)
6. Association internationale de radioprotection (AIRP 84)

Adaptation de (Ma 85)

Tableau 5
Lignes directrices canadiennes pour l'exposition aux ultrasons transmis dans l'air. Les niveaux de pression acoustique, par bande de tiers d'octave, sont indépendants de la durée d'exposition car les effets subjectifs peuvent apparaître immédiatement.

Fréquence (kHz)	NPA (dB)
16	75
20	75
25	110
31,5	110
40	110
50	110

Les limites d'exposition professionnelle recommandées dans le présent document peuvent être dépassées s'il est impossible de réduire les niveaux de pression acoustique par des moyens techniques (voir le paragraphe 4.2.2 ci-dessous) et si les travailleurs portent des protecteurs d'oreilles qui réduisent les niveaux ultrasonores à l'oreille aux niveaux de pression acoustique indiqués dans le tableau 5. Toutefois, pour éviter tout danger de réchauffement dans la plage des fréquences ultrasonores, le niveau de pression acoustique linéaire total mesuré ne doit jamais dépasser 137 dB pour toutes les autres parties du corps. Cette valeur est basée sur la valeur la plus faible (140 dB) (voir la figure 2) qui a présumément provoqué un léger réchauffement des plis de la peau. Une marge de sécurité de 3 dB (un facteur de 2 pour l'énergie) devrait empêcher tout réchauffement important du corps humain.

4.2.2 Mesures de protection eontze l'exposition aux ultrasons transmis dans l'air

Les mesures de sécurité visant à protéger le personnel sont similaires aux mesures recommandées pour les bruits audibles. L'objectif est de faire en sorte que les niveaux de pression acoustique ambiants ne dépassent pas le niveau d'exposition maximal admissible recommandé. Pour cela, il faut d'abord mesurer le NPA (voir les techniques de mesure à l'annexe 1), puis réduire les niveaux d'exposition là où c'est nécessaire, de préférence par des moyens techniques,

comme la réduction du niveau ultrasonore à la source ou l'installation de barrières acoustiques sur le trajet des ultrasons. Si cela est impossible, des protecteurs adéquats doivent être portés sur les oreilles.

Les mesures de protection sont beaucoup plus simples et plus économiques dans la gamme des fréquences ultrasonores que dans la gamme des fréquences audibles car les fréquences ultrasonores plus élevées ont tendance à être beaucoup plus facilement absorbées et réfléchies vers l'intérieur par les enceintes de protection. En outre, le rayonnement ultrasonore est beaucoup moins sujet à la diffraction par les orifices. Gold et coll. (Go 84) ont observé qu'un morceau de carton de 3 mm d'épaisseur était suffisant pour réduire les NPA de 70 dB entre 20 et 50 kHz. Crabtree et Forshaw (Cr 77) ont construit des enceintes relativement simples pour plusieurs appareils à nettoyer ultrasonores qui avaient produit des niveaux de pression acoustique, pour les ultrasons transmis dans l'air, supérieurs à la norme d'Acton. L'une de ces enceintes, constituée de contre-plaqué de 3/4 po revêtu d'une couche de styromousse d'un pouce et comportant un couvercle et un panneau antérieur fixés avec des charnières de piano, a permis d'atténuer le NPA de 85 à 55 dB dans la bande de tiers d'octave centrée sur 16 kHz. Des locaux ont été aménagés dans un hangar pour de gros appareils à nettoyer, avec des matériaux de construction simples tels que du placoplâtre de 1/2 po et du contre-plaqué de 1/4 po. On a obtenu une atténuation d'au moins 40 dB, sans avoir àrendre les portes étanches. Acton (Ac 67) a décrit des mesures de protection simples prises pour une batterie d'appareils à nettoyer ultrasonores. L'enceinte était en chlorure de polyvinyle et Perspex, avec des rails en acier inoxydable à l'extérieur pour les portes. (On a utilisé ces matériaux en raison de leur résistance aux vapeurs corrosives produites lors du nettoyage.) Bien que l'enceinte fût loin d'être parfaitement étanche, Acton et Carson (Ac 67) ont réussi à atténuer le niveau de puissance acoustique de 10 dB à 20 kHz et de 15 dB à 40 kHz avec cet écran, ce qui était suffisant pour éliminer les effets subjectifs.

Lorsqu'il est pas impossible de faire appel à des solutious techniques, les protecteurs d'oreilles constituent un moyen simple et efficace de réduire le son aux fréquences ultrasonores. La réduction du niveau de pression acoustique aux fréquences ultrasonores devrait être d'au moins 14 dB avec les casques protecteurs et les bouchons en caoutchouc et de 24 dB avec les bouchons en mousse (Ac 83).

Annexe 1
Mesure des ultrasons transmis dans l'air

Les mesures doivent être effectuées aux endroits (généralement le lieu de travail) où une personne est exposée. Des mesures de champ préliminaires doivent être effectuées en diverses positions. La mesure finale du niveau de pression acoustique (NPA) doit être faite à la position de l'oreille de l'opérateur où le NPA est maximal. S'il existe une autre position à laquelle d'autres parties du corps de l'opérateur peuvent être exposées àun NPA de 137 dB ou plus, c'est cette valeur du NPA qui doit être comparée aux normes d'exposition.

Pour un signal directionnel, il convient d'estimer l'angle d'incidence, à moins que l'on estime que le champ ultrasonore est omnidirectionnel (diffus). Pour ce faire, on peut observer les changements de l'indication du sonomètre en fonction de l'orientation du microphone. Si le signal est directionnel, aux fréquences pour lesquelles l'orientation angulaire est importante, on observera une diminution pouvant atteindre 10 dB dans l'indication du sonomètre lorsque l'angle d'incidence varie de 0° (incidence normale) à 90° (incidence rasante). Enfin, on comparera la valeur spatiale maximale du NPA mesurée, après correction des erreurs systématiques possibles, plus la valeur absolue de l'incertitude estimée, avec les limites d'exposition admissibles recommandées indiquées au tableau 5 (section 4.2.1). Pour déterminer l'incertitude, il faut additionner les incertitudes estimées qui sont associées aux différentes sources d'erreur dans la mesure.

En résumé, pour juger raisonnablement si les limites recommandées ont été dépassées, il est important de déterminer la position du microphone à laquelle le niveau de pression acoustique, une fois

que les erreurs systématiques possibles sont corrigées, est maximal. Il est indispensable, en outre, d'estimer raisonnablement l'incertitude de la mesure. Les méthodes à utiliser sont décrites en détail ci-dessous.

L'étalonnage absolu d'un sonomètre au lieu de mesure s'effectue généralement à une seule fréquence, habituellement 1 kHz ou moins. Par conséquent, pour que les mesures soient fiables, il convient de corriger systématiquement en fonction de la réponse en fréquence relative du matériel utilisé pour la mesure des ultrasons transmis dans l'air. On peut trouver la correction àapporter dans les spécifications du fabricant; l'incertitude associée à cette correction doit alors être utilisée dans l'estimation finale de l'incertitude. On ne peut déterminer l'incertitude finale à partir du type normalisé de sonomètre car les tolérances permises à des fréquences élevées sont extrêmement variables. Par exemple, pour un sonomètre de précision de type 1, tel que défini soit dans la Publication 651 de la Commission électrotechnique internationale (CEI 1979) soit dans la norme ANSI S1.4-1983 de l'American National Standards Institute (ANSI 1983), les tolérances concernant la réponse en fréquence entre 16 kHz et 20 kHz varient entre 3 DB et moins l'infini. Au-dessus de 20 kHz, aucune tolérance n'est spécifiée. Bien entendu, il existe des sonomètres de type 1 appropriés pour la mesure des ultrasons transmis dans l'air, mais l'indication du sonomètre dépendra de la réponse en fréquence du microphone et des amplificateurs du sonomètre.

La réponse en fréquence du sonomètre peut être décomposée en deux éléments: la réponse en fréquence électrique du sonomètre [avec des tolérances normalisées allant jusqu'à 100 kHz spécifiées dans la norme ANSI S1.4-1985 (ANSI 1985)] et la réponse en fréquence du microphone due aux effets de diffraction. Aux fréquences auxquelles la taille du microphone ne semble plus négligeable, la réponse en fréquence dépend également de l'angle d'incidence. Là encore, il convient de se référer aux spécifications du fabricant pour apporter les corrections appropriées selon que la réponse est angulaire ou omnidirectionnelle à la fréquence considérée.

On peut déterminer si le champ ultrasonore peut être assimilé à un champ libre ou à un champ omnidirectionnel en traçant un spectre approximatif du champ, si l'on connaît la relation approximative entre l'indication du sonomètre et l'angle d'incidence, les dimensions du local ainsi que le matériau dont sont faits les murs ou les barrières se trouvant dans le local. Si l'on est capable de déterminer la nature du champ, il est possible que l'on puisse choisir entre plusieurs types de microphones différents permettant d'effectuer des mesures avec une incertitude relativement faible[3].

Si le champ est toujours assimilable à un champ libre, un microphone d'un quart de pouce conçu pour une réponse en fréquence en champ libre uniforme, fonctionnant sous une incidence normale et sans la grille protectrice, convient pour les bandes d'octave dont la fréquence médiane est inférieure à 50 kHz. Dans la mesure où la réponse en fréquence est corrigée, on peut aussi utiliser un microphone d'un quart de pouce fonctionnant avec la grille protectrice en place. Un microphone d'un demi-pouce conçu pour une réponse en fréquence en champ libre uniforme, fonctionnant sous une incidence normale avec la grille protectrice en place, convient pour les bandes d'octave dont la fréquence médiane est inférieure à31,5 kHz ou pour les signaux en bande étroite de fréquence inférieure à 40 kHz. Si l'on applique les spécifications du fabricant pour la réponse en fréquence relative, on peut réduire les incertitudes globales associées à l'indication du sonomètre à moins de ±1,5 dB.

Pour les champs omnidirectionnels, le meilleur microphone est un microphone d'un quart de pouce conçu pour une réponse en fréquence uniforme à un angle d'incidence variable, fonctionnant sans la grille protectrice. Là encore, on peut utiliser la grille protectrice si l'on apporte les corrections nécessaires. Par contre, dans les

3. Les explications suivantes relatives aux microphones fournissent un exemple de la planification requise pour les mesures des ultrasons transmis dans l'air. Elles sont basées uniquement sur les spécifications des microphones utilisés au BRPIM. Ces spécifications peuvent varier suivant les fabricants.

champs omnidirectionnels, le microphone d'un demi-pouce ne convient pas aux fréquences supérieures à 25 kHz en raison de la chute abrupte dans la réponse.

La principale difficulté que pose la mesure des ultrasons transmis dans l'air vient du fait que le champ ultrasonore consiste en fait en une superposition d'un champ omnidirectionnel et d'un champ libre et qu'il est impossible de déterminer l'intensité de chaque type de champ. Dans ce cas, la meilleure façon de réduire les incertitudes au minimum consiste à utiliser un microphone d'un quart de pouce fonctionnant sans la grille protectrice et sous incidence rasante par rapport àla composante directionnelle apparente du champ ultrasonore. Dans ces conditions, la différence entre la réponse au champ omnidirectionnel et la réponse au champ libre est inférieure à 1 dB jusqu'à 30 kHz et à 2 dB jusqu'à 40 kHz. Par conséquent, on peut réduire les incertitudes dans les mesures du NPA à moins de ±2 dB environ. Malheureusement, si l'on utilise continuellement le microphone sans sa grille protectrice, on augmente considérablement les risques de dommages mécaniques irrémédiables. Une autre solution consiste à utiliser le microphone d'un quart de pouce avec sa grille protectrice près de l'incidence rasante. On peut corriger en utilisant une réponse située à mi-chemin entre la réponse omnidirectionnelle et la réponse correspondant àl'incidence rasante en champ libre. La différence entre ces deux réponses est inférieure à 4 dB jusqu'à 40 dB. Avec cette méthode, on devrait pouvoir réduire l'incertitude à moins de ±3 dB. En raison de la chute abrupte dans la réponse àincidence rasante en champ libre avec un microphone d'un demi-pouce à environ 20 kHz et des grandes différences entre la réponse à une incidence normale en champ libre et la réponse omnidirectionnelle, le microphone d'un demi-pouce ne convient pas du tout pour les mesures dans les champs ultrasonores dans lesquels la composante omnidirectionnelle est importante.

Il convient aussi de tenir compte de la plage dynamique lorsqu'on établit une méthode de mesure. La limite supérieure du NPA que l'on peut mesurer de façon sûre peut dépendre de la longueur du câble car la puissance de sortie du préamplificateur est limitée par

la charge capacitive d'un long câble. Dans la gamme de fréquences comprise entre 20 kHz et 50 kHz, qui est celle du matériel utilisé dans notre laboratoire, le NPA peut être limité àmoins de 130 dB pour des câbles de plus de 3 m de longueur. La limite inférieure du NPA que l'on peut mesurer de façon sûre dépend de la taille du microphone. Par exemple, on ne peut pas utiliser un microphone de 1/8 de pouce avec les ultrasons de basse fréquence, même si la réponse en fréquence est très uniforme, car le faible rapport signal/bruit de ces petits microphones limite le NPA minimal mesurable à environ 76 dB, valeur supérieure aux limites d'exposition recommandées dans les bandes de tiers d'octave centrées sur 16 et 20 kHz.

Commes les limites recommandées sont données par bandes de tiers d'octave, il convient d'utiliser des filtres de tiers d'octave (ou un analyseur de spectre). L'erreur sur le NPA associée à la réponse en fréquence du filtre et l'erreur sur le NPA associée à la précision de l'analyseur doivent être déterminées àpartir des spécifications du fabricant et elles doivent être incluses dans l'estimation de l'incertitude. Par ailleurs, étant donné le saut de 75 à 110 dB dans l'exposition admissible lorsqu'on passe de la bande de tiers d'octave centrée sur 20 kHz à la bande centrée sur 25 kHz, il faut faire particulièrement attention lorsqu'on effectue des mesures à 20 kHz. Un appareil émettant seulement dans la bande centrée sur 25 kHz pourrait, suivant les «jupes» du fitre de bande de 20 kHz utilisé, *sembler* émettre dans la bande centrée sur 20 kHZ avec un NPA non négligeable. Étant donné les tolérances relativement élevées admises par les normes en ce qui concerne les «jupes» des filtres, par exemple la norme ACNOR Z107.5-1975 (ACNOR 1975) ou la norme CEI 225 (CEI 1996, en cours de révision), les résultats obtenus avec divers filtres de bande de tiers d'octave satisfaisant les mêmes normes peuvent présenter des différences importantes. Il est donc essentiel de bien connaître la réponse en fréquence du filtre de bande de tiers d'octave, spécifiée par le fabricant, et d'en tenir compte dans les mesures.

Annexe 2
Glossaire

Le but de ce glossaire est d'expliquer les termes utilisés dans le présent document que certains lecteurs pourraient ne pas connaître. Les explications sont basées sur les définitions normalisées données dans les références citées. Dans certains cas, les définitions ont été raccourcies ou paraphrasées pour plus de clarté. Le lecteur trouvera daus les normes citées des définitions plus rigoureuses.

Audible supérieure – Qui se rapporte aux ondes ou aux vibrations dont les fréquences se situent dans la partie supérieure de la gamme des fréquences audibles. Dans le présent document, les ondes audibles supérieures sont des ondes acoustiques dont la fréquence se situe entre 10 et 18 kHz (Mi 74).

Bande de tiers d'octave – Intervalle entre deux fréquences dont le rapport est égal à $2^{1/3}/1$. Ces fréquences définissent les limites de la bande. Normalement, la bande est désignée par sa fréquence médiane, qui est la moyenne géométrique des deux fréquences limites. Pour les fréquences audibles supérieures et ultrasoniques, les bandes ont été appelées bandes de 10, 12,5, 16, 20, 25, 31,5, 40 et 50 kHz (ACNOR 75).

Cavitation – Au sens large, toute activité d'origine sonore associée à des masses hautement compressibles (bulles) de gaz ou de vapeur dans le milieu de propagation. Par exemple, formation de bulles dans le liquide entourant l'élément actif d'un désintégrateur de cellules. Avec les ultrasons de puissance élevée, cette activité est habituellement imprévisible et violente (NCRP 83).

Champ libre – Condition de propagation de l'onde acoustique dans un milieu isotrope homogène (par exemple, l'air) dont les limites (par exemple, les murs d'uue piéce) exercent un effet négligeable sur l'onde acoustique (CEI 84).

Champ omnidirectionnel – Condition de propagation des ondes acoustiques donnant naissance à un champ acoustique qui possède une densité d'énergie statistiquement uniforme et dans lequel les directions de propagation en tout point du champ sont distribuées de façon aléatoire (CEI 84).

Déplacement temporaire de seuil (TTS) – Perte d'audition temporaire consécutive à une exposition àune onde acoustique. La sensibilité auditive perdue est récupérée, en tout ou en partie, au bout d'une période de temps donnée après que l'exposition a cessé (OI 75).

Niveau de pression acoustique (NPA) – Exprimé en décibels (dB), le NPA est égal à 20 fois le logarithme décimal du rapport entre une pression acoustique donnée et la pression acoustique de référence, qui est égale à 20 micropascals (mPa) pour le son transmis dans l'air. La pression acoustique est la valeur efficace de la pression acoustique instantanée pendant un intervalle de temps donné (CEI 84).

Production de micro-courants – Courant fluide circulaire à l'échelle du micromètre. Se produit souvent au voisinage de bulles en vibration qui ont été mises en mouvement par suite du phénomène de cavitation dû aux ultrasons de puissance élevée (NCRP 83).

Réponse – Signal de sortie d'un dispositif résultant d'un stimulus appliqué dans des conditions précises. Par exemple, la réponse d'un microphone est la tension de sortie produite par une onde acoustique envoyée sur le microphone (CEI 84).

Réponse en champ libre – Réponse d'un microphone àune onde acoustique incidente qui, une fois le microphone enlevé, se propagerait dans des conditions de champ libre (CEI 84).

Réponse omnidirectionnelle – Réponse d'un microphone à une onde acoustique incidente qui, une fois le microphone enlevé, se propagerait dans des conditions de champ omnidirectionnel (CEI 84).

Seuil d'audition – Pour un auditeur donné, niveau de pression acoustique minimal d'un son donné capable de provoquer une sensation auditive. Le son atteignant l'oreille, émis par d'autres sources, est supposé négligeable (CEI 84).

Transducteur – Dispositif capable de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique et réciproquement (CEI 86).

Ultrasonore – Qui se rapporte aux ondes ou aux vibrations ultrasonores. Dans le présent document, les ondes ultrasonores sont des ondes acoustiques ayant une fréquence supérieure à 18 kHz. La valeur limite de 18 kHz représente un compromis entre les deux valeurs les plus souvent rencontrées dans la documentation, 16 et 20 kHz.

Ultrasons de puissance élevée – Il n'existe pas de définition normalisée des ultrasons de puissance élevée. Dans le présent document, les ultrasons de puissance élevée sont des ultrasons possédant une puissance ou une intensité suffisante pour que l'énergie de vibration à laquelle la pièce de travail est exposée provoque un changement physique permanent (Sh 75).

Références

Ac 67 Acton, W.I., Carson, M.B. (1967). "Auditory and Subjective Effects of Airborne Noise from Industrial Ultrasonic Sources." Brit. J. Industr. Med., vol. 24, pp. 297-304.

Ac 68 Acton, W.I. (1968). "A Criterion for the Prediction of Auditory and Subjective Effects due to Airborne Noise from Ultrasonic Sources." Ann. Occup. Hyg., vol. 11, pp. 227-234.

Ac 74 Acton, W.I. (1974). "The Effects of Industrial Airborne Ultrasound on Humans." Ultrasonics, mai, pp. 124-128.

Ac 75 Acton, W.I. (1975). "Exposure Criteria for Industrial Ultrasound." Ann. Occup. Hyg., vol. 18, pp 267-268.

Ac 77 Acton, W.I., Hill, C.R. (1977). "Hazards of Industrial Ultrasound." Protection, vol. 14, no. 10, pp. 12-17.

Ac 83 Acton, W.I. (1983). "Exposure to Industrial Ultrasound: Hazards, Appraisal and Control." J. Soc. Occup. Med., vol. 33, pp. 107-113.

ACGIH 89 ACGIH (1989). Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices for 1988-1989. Disponible auprès de l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 6500 Glenway Ave., Bldg. D-7, Cincinnati, OH, É.-U. 45211-4438.

ACNOR 75 Norme Z107.5-1975 de l'Association canadienne de normalisation (ACNOR). "Octave, half-octave and third-octave Band Filter Sets." Disponible auprès de l'Association canadienne de normalisation, 178 Rexdale Blvd., Rexdale (Ontario) M9W 1R3.

AIRP 84 Association internationale de radioprotection (AIRP) (1984). "Interim Guidelines on Limits of Human Exposure to Airborne Ultrasound." Health Physics, vol. 46, pp. 969-974.

Al 48 Allen, C.H., Frings, H., Rudnick, I. (1948). "Some Biological Effects of Intense High Frequency Airborne Sound." J. Acoust. Soc. Am., vol. 20, pp. 62-65.

An 86 André, G., Damongeot, A. (1986), "Émissions sonores et ultrasonores lors du soudage par ultrasons. Risques et moyens de prévention." Cahiers de notes documentaires (no 123, 2ième trimestre). Disponible auprès de l'Institut national de recherche et de sécurité, 30, rue Olivier Noyer, 75680 Paris Cedex 14, France.

ANSI 83 Norme S1.4-1983 de l'American National Standards Institute (ANSI). "Specification for Sound Level Meters." Disponible auprès du Standards Secretariat, Acoustical Society of America, 335 East 45th Street, New York, NY, É.-U., 10017-3483.

ANSI 85 Norme S1.4a-1985 de l'American National Standards Institute (ANSI). "Amendment to ANSI S1.4-1983." Disponible auprès du Standards Secretariat, Acoustical Society of America, 335 East 45 th Street, New York, NY, É.-U., 10017-3483.

Ca 86 Carnes, K.I., Dunn, F. (1986). "Low-Kilohertz-Water-Borne Ultrasound Biological Effects." Radiat. Environ. Biophys., vol. 25, pp. 235-240.

CEI 66 Publication 225 (1966) de la Commission électrotechnique internationale (CEI). "Octave, Half-Octave and Third Octave Band Filters Intended for the Analysis of Sounds and Vibrations." Disponible auprès du Bureau Central de la Commission électrotechnique internationale, 3, rue de Varembé, Genève, Suisse.

CEI 79 Publication 651 (1979) de la Commission électrotechnique internationale (CEI). "Sound Level Meters." Disponible auprès du Bureau Central de la Commission électrotechnique internationale, 3, rue de Varembé, Genève, Suisse.

CEI 84 Publication 50(801) (1984) de la Commission électrotechnique internationale (CEI). "Advance Edition of the International Electrotechnical Vocabulary. Chapter 801: Acoustics and Electroacoustics." Disponible auprès du Bureau Central de la Commission électrotechnique internationale, 3, rue de Varembé, Genève, Suisse.

CEI 86 Publication 854 (1986) de la Commission électrotechnique internationale (CEI). "Methods of Measuring the Performance of Ultrasonic Pulse-Echo Diagnostic Equipment". Disponible auprès du Bureau Central de la Commission électrotechnique internationale, 3, rue de Varembé, Genève, Suisse.

Cr 77 Crabtree, R.B., Forshaw, S.E. (1977). "Exposure to Ultrasonic Cleaner Noise in the Canadian Forces." DCIEM, rapport technique #77X45. Disponible auprès du DCIEM, 1133 Sheppard Ave. W., P.O. Box 2000, Downsview, Ontario M3M 3B9.

Da 48 Davis, H. (1948). "Biological and Psychological Effects of Ultrasonics." J. Acoust. Soc. Am., vol. 20, pp. 605-607.

Da 54 Danner, P.A., Ackerman, E., Frings, H.W. (1954). "Heating in Haired and Hairless Mice in High-Intensity Sound Fields from 6 - 22 kHz." J. Acoust. Soc. Amer., vol. 26, pp. 731-739.

Da 66 Dallos, P.J., Linnell, C.O. (1966). "Subharmonic Components in Cochlear-Microphonic Potentials." J. Acoust. Soc. Am., vol. 40, pp. 4-11.

Do 67 Dobroserdov, V.K. (1967). "The Effect of Low Frequency Ultrasonic and High Frequency Sound Waves on Workers." Hygiene and Sanitation, vol. 32, pp. 176-181.

El 49 Eldredge, D.H., Parrack, H.O. (1949). "Biological Effects of Intense Sound." J. Acoust. Soc. Am., vol. 21, p. 55

FDA 81(a) Center for Devices and Radiological Health, Food and Drug Administration (1981). "An Evaluation of Radiation Emission from Video Display Terminals." HHS Publication (FDA) 81-8153, fév. 1981. Disponible auprès de la Division of Compliance, CDRH, Rockville, MD, É.-U. 20857.

FDA 81(b) Herman, B.A., Powell, D. (1981). "Airborne Ultrasound: Measurement and Possible Adverse Effects." HHS Publication (FDA) 81-8163, mai 1981. Disponible auprès du CDRH, Rockville, MD, É.-U. 20857.

Fe 84 Feller, A.M., Domres, B. (1984). "Cutaneous Gangrene and Osteonecrosis Resulting from Thermal Injuries Inflicted by Ultrasound." Akt. Traumatol. vol. 14, pp. 37-39.

Fi 68 Fishman, S.S. (1968). "Biological Effects of Ultrasound: In Vivo and In Vitro Haemolysis." Actes de la Western Pharmacology Society, vol. 11, pp. 149-150.

Gi 49 Von Gierke, H.E. (1949). "Sound Absorption at the Surface of the Body of Man and Animals." J. Acoust. Soc. Am., vol. 21, p.55.

Gi 50 Von Gierke, H.E. (1950). "Subharmonics Generated in the Ears of Humans and Animals at Intense Sound Levels." Federation Proc., vol. 9, p. 130(a).

Gi 52 Von Gierke, H.E., Parrack, H.O., Eldredge, D.N. (1952). "Heating of Animals by Absorbed Sound Energy." J. Cellular Comp. Physiol., vol. 39, pp. 487-505.

Go 84 Gold, R.E., Decker, T.N., Vance, A.D. (1984). "Acoustical Characterization and Efficacy Evaluation of Ultrasonic Pest Control Devices Marketed for Control of German Cockroaches." J. Econ. Entomology, vol. 77, pp. 1507-1512.

Gr 66 Grigor'eva, V.M. (1966). "Effect of Ultrasonic Vibrations on Personnel Working with Ultrasonic Equipment." Soviet Physics-Acoustics, vol. II, pp. 426-427.

Gr 80 Grzesik, J., Pluta, E. (1980). "Noise and Airborne Ultrasound Exposure in the Industrial Environment." Actes du 3ième Int. Congress on Noise as a Public Health Problem. Freiburg, Allemagne de l'Ouest, 25-29 septembre 1978. ASHA Reports 10. The American Speech-Language-Hearing Association, Rockville, Maryland, avril 1980, pp. 657-661.

Gr 83 Grzesik, J., Pluta, E. (1983). "High Frequency Hearing Risk of Operators of Industrial Ultrasonic Devices." Int. Arch. Occup. Environ. Health, vol. 53, pp. 77-78.

Gr 86 Grzesik, J., Pluta, E. (1986). "Dynamics of High-Frequency Hearing Loss of Operators of Industrial Ultrasonic Devices." Int. Arch. Occup. Environ. Health, Vol. 57, pp. 137-142.

He 81 Herbertz, J., Grunter, K. (1981). "Untersuchungen zur hoerkurvenmaessigen Bewertung von Ultraschall in Luft." Fortschritte der Akustik - DAGA'81. Berlin: VDE-Verlag, pp. 509-512.

He 84 Herbetz, J. (1984). "Loudness of Airborne Ultrasonic Noise." Actes de la Conférence internationale sur les ultrasons (1983), S. 226-231.

Kn 68 Knight, J.J. (1968). "Effects of Airborne Ultrasound on Man." Ultrasonics, janvier, pp. 39-42.

Ma 85 auf der Maur, A.N. (1985). "Limits of Exposure to Airborne Ultrasound." Ann. Am. Conf. Ind. Hyg., vol. 12, pp. 177-181.

Mi 74 Michael, P.L. et coll. (1974). "An Evaluation of Industrial Acoustic Radiation above 10 kHz." Préparé pour le N.I.O.S.H. dans le cadre du contrat no HSM-99-72-125.

NCRP 83 Rapport #74 (1983) du NCRP. "Biological Effects of Ultrasound: Mechanisms and Clinical Implications." National Council on Radiation Protection and Measurements, 7910 Woodmont Avenue, Bethesda, MD, É.-U. 20814.

Ne 80 Neppiras, E.A. (1980). "Acoustic Cavitation Thresholds and Cyclic Processes." Ultrasonics, septembre, pp. 201-209, 230.

Ol 75 Industrial Noise and Hearing Conservation (1975). J.B. Olishifski and E.R. Harford, eds. National Safety Council, 425 North Michigan Ave., Chicago, IL, U.S.A. 60611.

OMS 88 Hill, C.R., ter Haar, G. (1988). "Ultrasound," dans Non-Ionizing Radiation Protection, ed. M.J. Suess. Copenhague: Organisation mondiale de la santé, Publications régionales.

Pa 66 Parrack, H.O. (1966). "Effect of Air-borne Ultrasound on Humans." Internat. Audiol., vol. 5, pp 294-308.

Ro 57 Romani, J.D., Bugard, P. (1957). "Nouveaux essais sur l'action des bruits sur le système endocrinien." Svudy-ivs, bol. 7, pp. 92-93.

Sh 75 Shoh, A. (1975). "Industrial Applications of Ultrasound – A Review. I. High-Power Ultrasound." IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, vol. SU-22, no. 2, pp. 60-71.

Sk 65 Skillern, C.P. (1965). "Human Response to Measured Sound Pressure Levels from Ultrasonic Devices." Indust. Hyg. J., vol. 26, pp. 132-136.

Sw 82 Normes suisses de santé et sécurité au travail (1982). "Ultrasonic Equipment as a Source of Noise." No 137. Publié par Schweizerische Unfallversicherungsenstalt, 6002 Lucerne, Suisse.

USAF 76 United States Air Force (1976). Hazardous Noise Exposure. USAF Regulation 161-35.